ANNALES
DE
L'INSTITUT NATIONAL
DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut natioual de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1963, **14** (1), 5-12

1631. 871 ; 631. 452

INFLUENCE DE LA PAILLE A DIFFÉRENTS ÉTATS DE FERMENTATION SUR LA FERTILITÉ D'UN SOL

R. CHAMINADE
Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine et Oise)

SOMMAIRE

De la paille de blé a été soumise à une fermentation à l'étuve pendant des temps variables.

L'effet de cette paille à différents états d'humification sur la fertilité a été testé par des essais en petits vases de végétation. Les observations portent sur les rendements obtenus et sur l'influence de la matière organique humifiée sur l'utilisation de l'azote.

Au cours de travaux précédents nous avons montré que la matière organique humifiée agissait sur la physiologie des végétaux, stimulant leur métabolisme et provoquant une augmentation de rendement. C'est là un aspect important des relations entre matière organique et fertilité. La matière organique, par ce mécanisme, permet une meilleure efficacité de la fertilisation minérale.

Dans ce travail, nous rapporterons les résultats d'essais relatifs à l'influence de l'état d'humification de la paille sur la fertilité du sol et nous préciserons quelques aspects du rôle physiologique de la paille humifiée.

TECHNIQUES

1. — Fermentation de la paille

Des échantillons de 20 g de paille de blé (correspondant à 19,25 g de matière sèche), broyée et homogénéisée ont été mis dans des pots de polyéthylène et placés à l'étuve à 40° après addition de 50 cc d'une solution d'urée à 5,2 g par litre ; les pots étaient couverts pour limiter l'évaporation.

Chaque semaine, ils étaient ramenés à humidité constante par addition d'eau. Le poids paille + eau qui était de 70 g au début de l'expérience a été abaissé à 60 g au bout de 2 semaines de fermentation, 50 g à partir du 2e mois, 30 g au 4e mois et 20 g les 5 et 6e mois.

Cette diminution tenait compte de la perte de matière organique consécutive à la fermentation.

Les départs de fermentation ont été échelonnés de façon à obtenir, au début des essais en vases de végétation, des échantillons présentant des temps de fermentation de : 6 mois, 4 mois, 2 mois et 2 semaines.

Les poids moyens de matière sèche restant après les différents temps de fermentation étaient les suivants :

Fermentation 2 semaines	: 12,6 g
Fermentation 2 mois	: 11 g
Fermentation 4 mois	: 4,4 g
Fermentation 6 mois	: 4,8 g

2. — Essais en vases de végétation

Ces essais ont été réalisés sur Ray-grass suivant la technique précédemment décrite (Chaminade, 1960).

Le sol utilisé était un sous-sol de limon, très pauvre en matière organique.

La comparaison portait entre le Témoin ne recevant pas de matière organique et des sols enrichis en matière organique par addition, pour 1 kg de sol, soit de 20 g de paille non fermentée, soit de la quantité de paille humifiée correspondant à 20 g de paille fraîche.

Les matières organiques étaient soigneusement mélangées au sol qui recevait une fumure minérale complète apportant par pot :

0,383 g de PO_4H_2K
1,847 g de CO_3KH
1 g de $SO_4Mg, 7H_2O$

oligoéléments :

0,008 g SO_4Mn
0,006 g SO_4Zn
0,008 g SO_4Cu
0,005 g acide borique
0,005 g molybdate d'ammonium

Fumure azotée. — L'apport d'azote a été fractionné tout au long de la période de végétation par addition hebdomadaire d'une solution de $(NO_3)_2$ Ca.

Quatre apports d'azote ont été réalisés avant la première coupe et trois entre chacune des coupes suivantes.

Par ailleurs, chaque essai correspondant à un traitement organique (témoins ou pailles à différents états de fermentation) comportait une série de pots recevant des doses croissantes d'azote.

Les quantités d'azote apportées ont été les suivantes:

Avant la première coupe (en 4 apports) : 0, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 mg N par pot ; entre chacune des coupes suivantes (en 3 apports) : 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 mg N par pot.

Les pots étaient amenés à poids constant par arrosage. La quantité d'eau correspondait au 2/3 de la capacité de saturation du sol.

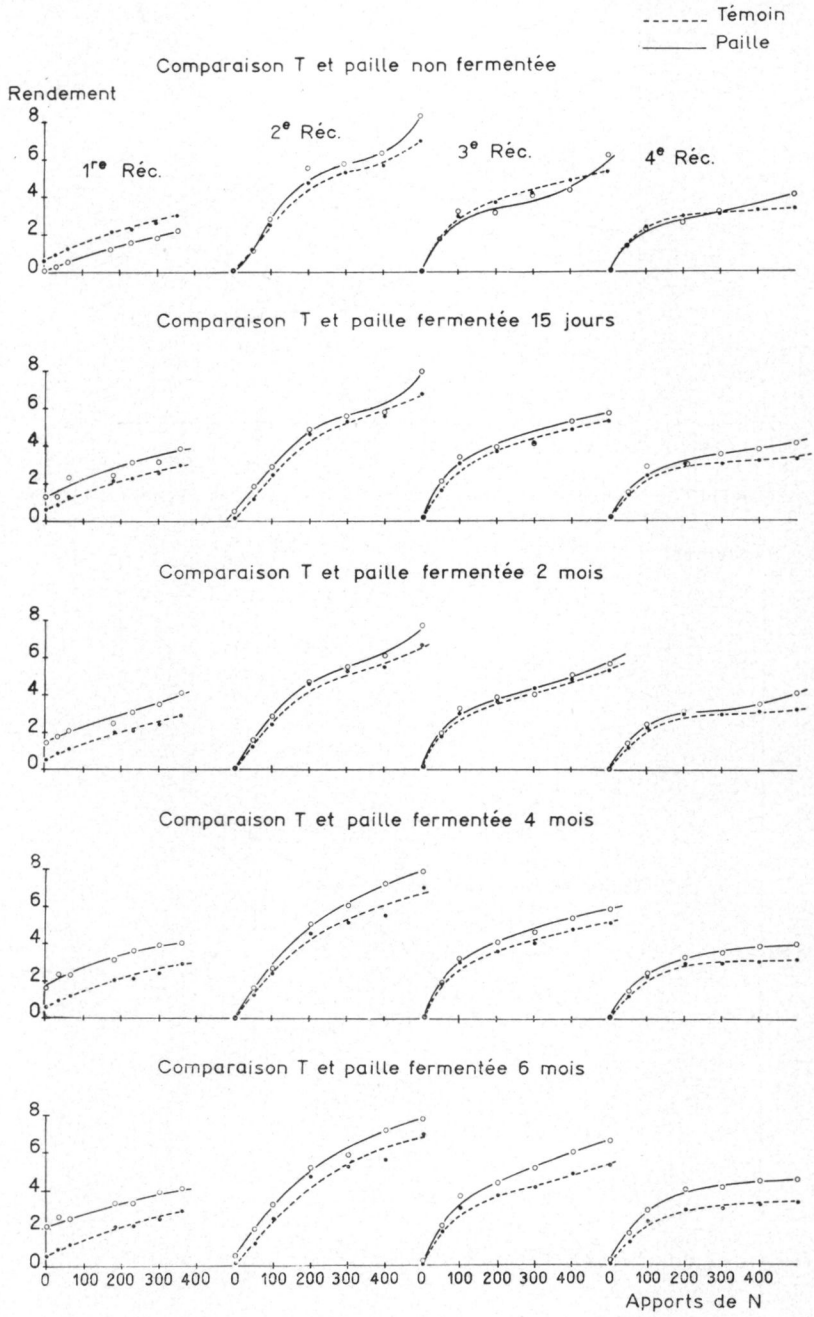
Chaque pot a reçu 1000 graines de Ray-Grass soigneusement réparties sur la surface du sol, préalablement bien aplanie et recouverte d'une couche de 1 mm de sable fin. Les graines ont été ensuite recouvertes du même sable, et légèrement arrosées. Pour maintenir l'humidité, les pots sont restés couverts pendant la période de germination.

Lorsque la germination a été totale — ce qui a demandé environ une semaine à la température de 20° — les pots ont été découverts et leur humidité amenée progressivement à la valeur voulue, celle-ci étant atteinte une semaine après la germination.

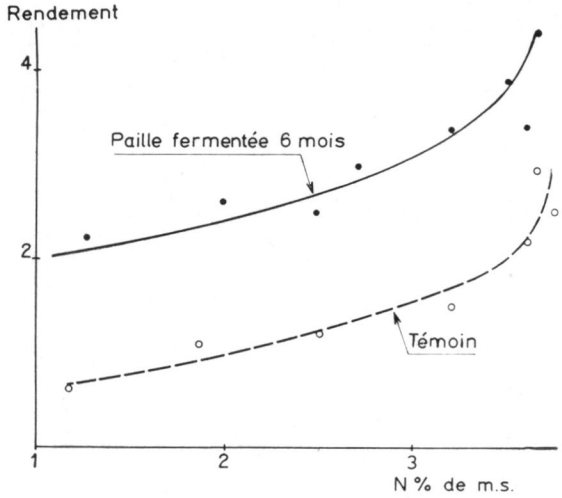
RÉSULTATS

1. — Rendement en fonction des apports d'azote

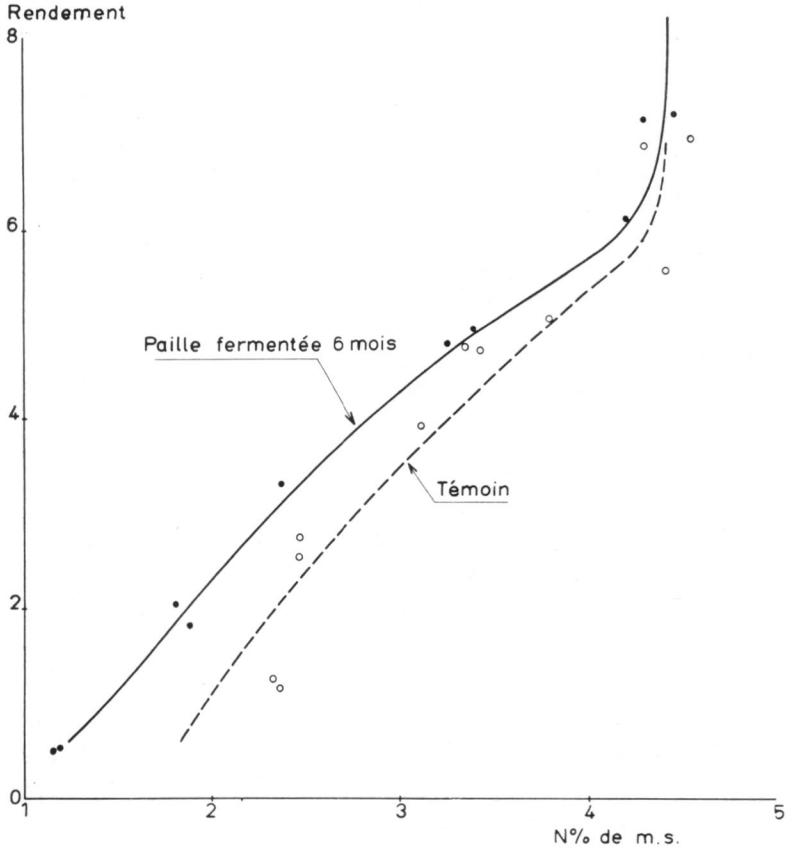
Les graphiques 1 donnent, pour les quatre récoltes successives les rendements en fonction des apports d'azote dans les Témoins et les échantillons additionnés de paille à différents états de fermentation.



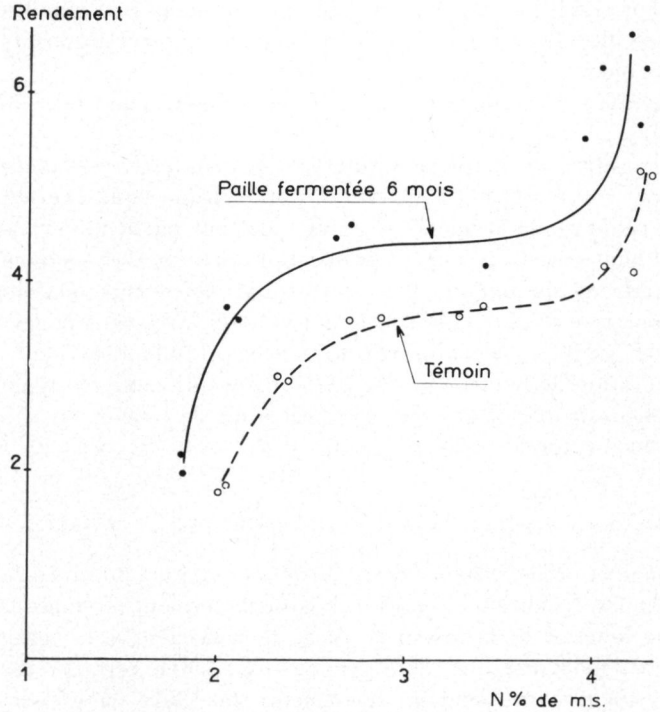
GRAPHIQUE I. — *Rendements des différentes récoltes en fonction des apports d'azote*



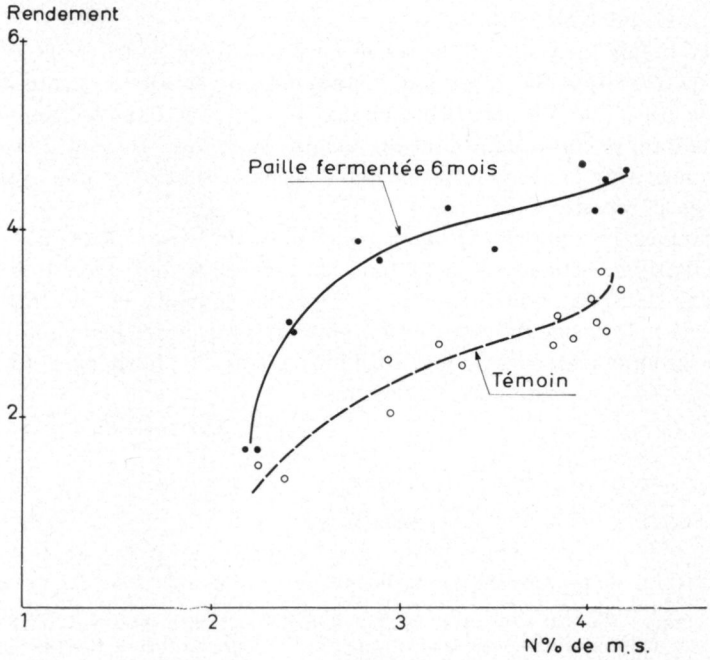
GRAPHIQUE 2. — *Rendements en fonction de la teneur en azote des végétaux — 1ère récolte*



GRAPHIQUE 3. — *Rendements en fonction de la teneur en azote des végétaux — 2e récolte*



GRAPHIQUE 4 — *Rendements en fonction de la teneur en azote des végétaux — 3e récolte*



GRAPHIQUE 5. — *Rendements en fonction de la teneur en azote des végétaux — 4e récolte*

L'effet dépressif bien connu de la paille non fermentée se manifeste nettement à la première récolte. Il s'atténue dans les récoltes suivantes et disparaît pratiquement à la quatrième coupe.

Deux semaines de fermentation à l'étuve suffisent pour faire disparaître cet effet dépressif.

L'action positive de la paille fermentée se manifeste nettement à partir de quatre mois de fermentation. Il est encore plus marqué pour une fermentation de six mois. Les résultats de la quatrième coupe mettent particulièrement en évidence ces effets dont nous avons, au cours de publications précédentes, souligné la spécificité.

Les rendements du témoin, pour cette quatrième coupe plafonnent à partir de la quatrième dose d'azote. Les sols ayant été très largement pourvus en tous les éléments minéraux il ne peut apparaître des facteurs minéraux limitants.

L'augmentation de rendement due à la présence de matière organique humifiée doit donc être considérée comme un effet spécifique de celle-ci car elle ne peut être obtenue par aucun apport minéral.

2. — Action de la matière organique humifiée sur l'utilisation de l'azote

Pour examiner cette influence de la matière organique humifiée, on a tracé pour les Témoins et les échantillons ayant reçu la paille fermentée 6 mois, les courbes des rendements en fonction de la teneur en azote de la matière sèche (graphiques 2 à 5).

Ces courbes montrent que, dans tous les cas, à une certaine teneur en azote de la matière sèche correspond un rendement plus élevé en présence de matière organique humifiée.

La présence de matière organique humifiée dans le sol a donc permis à la plante de mieux utiliser l'azote absorbé.

Pour la première récolte le décalage entre les deux courbes est considérable. Il montre qu'à un rendement de 2 g correspond une teneur en azote de la plante qui passe de 1,2 p. 100 en présence d'humus à 3,5 p. 100 dans le Témoin.

Les résultats se confirment dans les récoltes suivantes. Ils sont quantativement moins marquée pour la seconde récolte mais apparaissent avec une grande netteté dans la 3e et 4e récoltes.

Nous avions établi précédemment (Chaminade, 1958) pour des cultures en solutions nutritives cette action de l'humus sur l'efficacité de l'azote. Elle se confirme ici nettement dans les conditions du sol. D'autres travaux (Blanchet, 1958) ont montré que le mécanisme de cette action pouvait s'expliquer pour une intervention de certains groupements organiques de l'humus sur la physiologie du végétal et, en particulier sur des réactions diastasiques.

Reçu pour publication en octobre 1962

SUMMARY

THE EFFECT OF STRAW OF DIFFERENT DEGREE OF DECOMPOSITION ON SOIL FERTILITY

Ground samples of wheat straw were incubated under controlled conditions of temperature for a fortnight, two months, four months and six months. The effect of these samples on soil fertility was tested in pot experiments.

The depressive effect of straw disappeared after two month incubation ; the samples subsequently showed a positive effect, reflected in higher yields in presence of decomposed straw than in controls receiving no organic matter. Maximum effects were obtained with straw incubated for six months (graph. 1).

The presence of humified organic matter was reflected in a better utilization of nitrogen by the plants. This is shown by curves on which yields are plotted against the nitrogen content of plants ; the curves indicate that a given yield is accompanied by a lower nitrogen content in presence of organic matter than in untreated controls (graphs 2-5).

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DES STROHS IN VERSCHIEDENEN GÄRUNGSSTUFEN AUF DIE BODENFRUCHTBARKEIT

Zerkleinerte Weizenstrohproben wurden unter Kontrollbedingungen und während einer Dauer von zwei Wochen und zwei, vier und sechs Monaten einer Gärung in der Trockenkammer unterworfen.

Der Einfluss auf die Fruchtbarkeit wurde durch Versuche in kleinen Vegetationsgefässen kontrolliert.

Der depressive Einfluss des Strohs verschwindet nach zweiwöchiger Gärung. Über diese Zeit hinaus beginnt ein positiver humischer Einfluss, der sich durch höheren Ertrag in Gegenwart von humifiziertem Stroh im Vergleich zu den Kontrollen ohne organische Masse bemerkbar macht. Diese Wirkung erreicht ihren Höhepunkt für sechs Monate lang vergärtes Stroh (Darst. 1).

Die Gegenwart organisch humifizierter Masse macht sich durch eine bessere Ausnützung des Stickstoffs in den Pflanzen bemerkbar. Diese Tatsache wurde durch die Ertragskurven in Abhängigkeit des Stickstoffgehalts der Pflanzen herausgestellt. Diese Kurven zeigen, dass einem gewissen Ertrag ein niedrigerer Gehalt an Stickstoff in Gegenwart von Humus als in den Kontrollen ohne organische Masse entspricht (Darst. 2 bis 5).

РЕЗЮМЭ

Влияние заквашенной соломы в различных стадиях брожения на продуктиность почвы.

Р. ШАМИНАД (Версаль).

Пробы размолотой пшеничной соломы были подвержены, в условиях контроля, процессу брожения в сушилке, в течении двух недель, двух, четырех и шести месяцев.

Влияние заквашенной таким образом соломы на продуктивность почвы проверялось при помощи опытов в малых вегетационных вазах.

Было отмечено, что депрессивное действие соломы исчезает после двухнедельного брожения. По истечении этого срока начинает уже проявляться позитивное действие перегноя, немедленно отзывающееся увеличением урожайности в вазах с квашенной соломой, по сравнению с вазами контрольного варианта не содержащими органического вещества. Наибольший эффект достигается в вазах содержащих солому подвергшуюся шестимесячному брожению (табл. I).

Присутствие перегнойного органического вещества приводит также к улучшению использования азота растениями. Факт этот был отмечен при выведении кривых урожайности в зависимости от количеств азота содержащегося растениями. Кривые эти доказывают что данной урожайности в присутствии гуммуса соответствует меньшее количество азота в растении, чем в контрольных вариантах без органического вещества (табл. II-V).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANCHET R., 1958. Actions directes et indirectes de la matière organique humifiée sur la nutrition des végétaux vasculaires. *Ann. agron.*, **5**, 449-532.

CHAMINADE R., 1958. Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'Azote. *Ann. agron.*, **2**, 167-192.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. Type d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron.*, **2**, 121-133.

Ann. agron., 1963, **14** (1), 13-30

631. 473 (44)

LES SOLS ET L'AGRICULTURE DANS LES TERRAINS HUMIFÈRES DE LA VALLÉE DE BASSE-SEINE

E. JOUIS et Marie-Thérèse LECACHEUX

avec la collaboration technique de Mme MORTAIN

Station agronomique, Rouen (Seine-Maritime)

SOMMAIRE

Dans ce troisième et dernier mémoire de la série consacrée aux terroirs de la Vallée de Basse-Seine, est étudiée une chaîne type de sols humifères, homolithiques, sur alluvions fines argilo-calcaires de remblayage de la vallée, depuis la tourbe mésotrophe des parties basses jusqu'aux sols calcaires plus élevés, normalement pourvus en humus, des bords du Fleuve.

Après une présentation des résultats des analyses granulométriques et chimiques des 6 profils de la chaîne, la vocation et l'utilisation agronomique de ces sols sont mis en relief.

INTRODUCTION

Au cours du dépôt des alluvions modernes, lors de la lente remontée de la Seine consécutive à la fusion des glaces wurmiennes, les bords du fleuve furent toujours plus ou moins exhaussés par rapport aux surfaces lointaines en contact avec les flancs crayeux du lit majeur ou les pentes sablo-caillouteuses convexes des alluvions anciennes.

Il en résulte qu'il y eut constamment des tourbières latérales au fleuve, tourbières dont les parties les plus profondes étaient au contact de la colline.

De temps en temps, des crues ou des coups de mer rompaient les digues naturelles en quelques points et permettaient une irruption rapide de limon argilo-calcaire qui recouvrait de quelques décimètres ou plus, les tourbières en activité. Les nombreux sondages exécutés en Basse-Seine mettent en évidence des sols paléosols tourbeux successifs (E. JOUIS, 1958 et 1959).

Cette situation s'est en partie prolongée jusqu'au milieu du siècle dernier, moment où les premiers endiguements de la Seine furent entrepris.

LES SURFACES TOURBEUSES DE LA BASSE-SEINE

Il reste donc actuellement de nombreuses surfaces tourbeuses, soit dans la vallée de Seine proprement dite, soit dans les vallées des affluents jusqu'à une certaine distance du confluent.

Entre Rouen et la mer, il existe actuellement deux tourbières encore partiellement en activité. Le Marais Vernier sur la rive gauche au début de l'estuaire et La Harelle également sur la rive gauche, commune d'Heurteauville.

Le Marais Vernier a été abondamment décrit. Sa surface est évaluée à 1 590 ha dont 1 115 ha de tourbe à moins de 15 p. 100 de cendres, d'après la prospection effectuée en 1943/44 (second gisement tourbeux de France). Il a été assez récemment partiellement assaini et mis en culture.

La Harelle supporte encore une petite entreprise d'extraction de tourbe qui alimente diverses industries artisanales de composts. Les surfaces périphériques de plus en plus terreuses sont en partie plantées en peupliers et en partie exploitées en prairies, puis en labours quand la fraction minérale devient prépondérante. C'est une succession de sols de la Harelle que nous allons examiner ci-après.

La surface de La Harelle est de l'ordre de 250 hectares dont 150 en tourbe compacte ou en « marais flottant ».

Quelques petits marais tourbeux qui existaient jusqu'à une époque récente, par exemple au Trait sur la rive droite, aux abords du Havre, de Rouen, etc. ont été récupérés par les communes ou les Ponts et Chaussées au moyen de décharges de sols de terrassements, ou sont en cours de récupération pour des besoins portuaires, des implantations d'usines ou même d'immeubles d'habitations.

Par contre, les terrains marécageux, tourbeux, sont encore nombreux dans les petites vallées adjacentes.

Ces tourbes sont souvent alcalines, surtout si elles sont un peu mélangées de limon. L'eau des sourcins aux pieds des collines est toujours calcaire. Cependant les zones centrales des vieilles tourbières peuvent être acides, avec sphaignes quand elles baignent dans des eaux uniquement pluviales. De même les tourbes bordant les contours des alluvions anciennes peuvent devenir acides en surface.

La Harelle

La Harelle, où se trouve (sur 35 ha) la seule tourbière exploitée en vallée de Basse-Seine, est de forme semi-elliptique avec le grand axe adjacent au pied d'une falaise crayeuse abrupte haute d'une cinquantaine de mètres.

En réalité, la falaise passe de 70 m à l'amont (sud) à 40 m en aval (nord), car le socle calcaire sénonien supporte les alluvions anciennes du méandre de Caudebec, alluvions actuellement recouvertes par la forêt de Brotonne.

La Seine a retaillé fortement le bord Est du méandre primitif, d'où la falaise rectiligne sur plus de 8 km entre La Landu et La Mailleraye, puis, pour une cause qui doit être en relation avec la disparition du confluent de l'ancienne Austre-

berthe, le fleuve s'est nettement écarté de la falaise pendant 5 km, décrivant une courbe très plate s'écartant au maximum de 2 km. La tourbière se développe entre la falaise et cette courbe.

Par la suite, les alluvionnements fournirent un sol entièrement calcaire et exhaussé jusqu'à 5 m NGF en bordure du fleuve, alors que la surface moyenne de la tourbe active restait entre 2 m et 2,50 m.

C'est le passage graduel de la tourbe pure à l'alluvionnement pur qui forme la chaîne de sol étudiée.

Dans l'étude des sols du méandre de Duclair (E. Jouis, 1959), nous avons donné quelques indications sur les prairies tourbeuses exploitées en communaux, lesquelles bordent le contour des alluvions anciennes. Elles sont de très mauvaise qualité, par suite de leur position très basse, du mauvais drainage après la submersion hivernale et de leur mauvaise exploitation.

Certaines prairies de La Harelle sont également très basses, entre 2,50 et 3 m NGF, mais elles paraissent évacuer leur eau plus facilement et elles sont mieux soignées.

Profils examinés

Voici la liste des profils examinés. Elle comporte, de gauche à droite, le repérage par chiffre et lettre majuscule, les numéros d'analyse, la distance à la Seine, les Coordonnées Lambert, l'altitude NGF, la distance à la falaise :

11 A	R 2169/70	1 020 m	488,700/196,250	± 3 m	1 080 m
11 B	R 2171/73	840 m	488,950/195,730	± 3 m	1 210 m
11 C	R 2174/79	550 m	489,150/195,630	± 4 m	1 400 m
11 D	R 2180/87	380 m	489,350/195,600	± 5 m	1 580 m
11 E	R 2188/95	160 m	489,550/195,550	± 5 m	1 750 m
11 F	R 2196/03	100 m	489,630/195,560	± 5 m	1 810 m

Bien que la tourbière ne soit séparée de la falaise que par un chemin et un hallier étroit, on voit que la première prairie accessible, à peu près sur le petit axe de la demi-ellipse, se trouve à environ 1 km de la bordure. La partie intermédiaire est un « marais flottant » très dangereux, prolongé par un maigre taillis mélangé de joncs et de carex.

Dans ces parties profondes, l'épaisseur de la tourbe varie entre 4 et 6 mètres.

Par ailleurs, le premier profil A que l'on a voulu aussi loin que possible du fleuve, se trouve décalé d'environ 600 m au nord du suivant B.

Enfin la droite B C D E F étant perpendiculaire à la berge, il en résulte qu'elle fait un angle d'environ 60° avec la falaise, mais il y a toujours à peu près proportionnalité entre le rapprochement du fleuve et l'éloignement de la falaise.

Examinons maintenant chaque profil.

Profil A.

D'après la levée des tourbières de France de 1940, le sous-sol profond de la prairie est une tourbe reposant sur des alluvions argilo-calcaires assez uniformément situées à 4,40 m au-dessous, soit environ — 1,40 m. Rappelons que le 0 NGF correspond sensiblement au niveau des mers et que les plus basses mers peuvent descendre à — 4,41 NGF au Havre.

On voit que, comme pour le Marais Vernier, la tourbière de La Harelle, pourrait être en partie asséchée, si l'on creusait un canal à fort débit la reliant à la Seine et si l'on obturait ce canal par une vanne antimarée efficace.

Il s'agit d'une tourbe fibreuse, brune ou marron, à Hypnes, Sphaignes et diverses sortes de fougères. On peut rencontrer aussi quelques linaigrettes et carex. Au fond, des fragments de bois.

La teneur en cendres de la tourbe du sous-sol immédiat, jusqu'à 60 cm à 1 m varie de 15 à 20 p. 100 Elle s'abaisse à 10-15 p. 100 en profondeur, pour remonter à 20-25 p. 100 au fond.

En surface et jusqu'à 40 cm, on a noté un pH uniforme de 6,1.

Le sol prairial proprement dit, entre 0 et 15 cm, révèle une teneur en matière organique de 42,5 p. 100 du sol sec, soit 57,5 p. 100 de « cendres ». L'argile est de 8,3 p. 100 ; le limon de 10,5 p. 100 ; le sable très fin (20-50 μ) est à 32,1 p. 100 ; le sable fin (50-200 μ) est à 0,95 p. 100. Il y a 5,9 p. 100 de « sable grossier » et aucun caillou.

Le spectre sableux *tab-ebd* se rapporte à un limon fin assorti d'un peu de « sable grossier », mais il faut noter qu'il s'agit plutôt de débris organiques durs restés sur les tamis grossiers. En définitive la partie terreuse provient évidemment soit du limon du fleuve exondé, soit d'apports aériens du limon des plateaux voisins.

Le sol macroscopiquement plat, comporte un microrelief irrégulier de touffes de molinie bleue, de nombreuses touffes de joncs, des empreintes de pieds d'animaux (chevaux) plus ou moins remplies d'eau. Les ficaires et les renoncules sont abondantes. Les spirées, carex, lichnis roses sont fréquents. Les parties basses baignent sous quelques décimètres d'eau pendant une grande partie de l'année.

Le galop des chevaux fait trembler la surface de la prairie. Un homme pesant de son poids sur une perche l'enfonce facilement de plusieurs mètres. C'est l'extrême limite de l'utilisation d'un sol tourbeux. On ne pourrait l'utiliser pour des bovins qui risqueraient de s'y enliser.

Toutefois, avant 1914, les fossés étaient entretenus et l'on parvenait à faucher avec une faucheuse à chevaux en été. Il n'en est plus question actuellement.

On peut chercher à aplanir le sol avec un rouleau lourd en été, mais l'action ne dure pas et le sol se redéforme sous les pieds des animaux. D'ailleurs depuis l'abandon de l'entretien des fossés, de nombreuses prairies analogues à celles étudiées sont retournées à l'état de mauvais taillis plus ou moins inondés.

Le fermier utilise ce terrain pratiquement gratuitement. Il a fait un apport de 800 kg/ha de scories Thomas 18 p. 100 sur la meilleure partie et constaté une certaine venue d'herbe, appréciée des chevaux.

L'analyse chimique du sol vierge, par extraction au réactif Morgan (tampon acéto-acétique à pH 4,8) montre une grande pauvreté en acide phosphorique et en potasse, mais une bonne teneur en calcium et en magnésium.

On peut donc penser qu'avec un bon drainage et une bonne fumure phosphopotassique de telles prairies pourraient s'améliorer et devenir utilisables.

Profil B.

Il s'agit d'une prairie encore très tourbeuse située à 600 m de la précédente, mais rapprochée du fleuve de près de 200 m.

Le fond de la tourbe est à environ 4,50 NGF au-dessous de l'herbe, comme

pour la prairie précédente. En profondeur la tourbe est également la même, mais le sol est plus « terreux ».

Bien que comportant des points bas, l'ensemble est de quelques décimètres plus élevé qu'en A. Cependant, malgré la plus grande fermeté du sol, on enfonce encore aisément une perche en pesant seulement de son poids.

Entre 0 et 15 cm, le pH est de 6,8. La matière organique est de 27,50 p. 100 sur sec ; Argile : 13,9 p. 100 : limon : 24,5 p. 100 ; sable très fin : 30 p. 100 ; sable fin (50-200 μ) : 2,80 p. 100; sable grossier : 1,30 p. 100. Pas de cailloux.

Entre 15 et 35 cm, on note un net colmatage argileux, 18,5 p. 100 de matière organique ; 31 p. 100 d'argile, 24,7 p. 100 de limon ; 24,8 p. 100 de sable très fin et très peu de sable grossier. Le pH est à 7,1.

De 35 à 60 cm, la tourbe redevient prépondérante avec 68,5 p. 100 de matière organique. PH 6,8.

Autrement dit, ce second maillon de notre chaîne a subi un apport superficiel de limon argileux, au-dessus duquel la formation de la tourbe a nettement repris.

Le sol vierge montre les mêmes caractéristiques chimiques que dans la précédente prairie, mais la prairie a reçue, dans son ensemble, 800 kg/ha de scories 18 p. 100 et 200 kg/ha de chlorure de potassium en 1960.

La flore est nettement supérieure. On voyait une herbe assez fournie, riche en plantain lancéolé, avec une quantité notable de trèfle violet. Malheureusement les espèces de graminées n'étaient pas des meilleures : flouve, un peu de fétuque, des pâturins... Enfin, de nombreuses touffes de spirées.

Cette prairie est souvent fauchée.

Profil C.

Ce maillon est 300 mètres plus proche du fleuve. La cote atteint ± 4 m NGF et l'aspect est nettement plus sec. On se rapproche de la limite de la tourbière.

Ce profil est typique d'une forte arrivée de sédiment calcairo-argileux sur la tourbe en place. En effet, à partir de 65 cm de profondeur, la sonde traverse une tourbe d'abord normale et aqueuse, puis plus compacte que dans les profils précédents, le fond n'étant pas atteint avec la sonde de 1,30 m. Le document sur les tourbières de France signale des revêtements de plus de 1,50 m de terre argilo-calcaire en des points voisins du nôtre.

Autrement dit, la petite intercalation terreuse du profil B est ici transformée en une couche de 65 cm qui a rehaussé nettement le sol.

Toutefois des conditions encore un peu marécageuses prévalent par moment en surface, ce qui est indiqué par quelques rares touffes de joncs.

Entre 0 et 15 cm, la matière organique est de 15 à 16 p. 100. Elle ne descend qu'à 13 p. 100 entre 15 et 30 cm, à 2,60 p. 100 entre 30 et 40 cm et 1,70 p. 100 entre 40 et 55 pour remonter à 3 p. 100 entre 55 et 65 cm à l'approche de la surface tourbeuse enfouie. L'argile passe de 15 p. 100 en surface à 24 p. 100 dans la dernière couche terreuse. Le limon varie un peu irrégulièrement de 18 à 27 p. 100. Les sables fins sont presque entièrement compris entre 20 et 50 μ, de 29 à 37 p. 100 pour les sables siliceux. Les sables grossiers sont très faibles, de 0,5 à 1,5 p. 100 pour les sables siliceux. Le spectre sableux siliceux est très stable : *vba/bba* en surface et *wba/aaa* en profondeur, avant la tourbe, ce qui indique un sédiment très fin, Il n'y a pas de cailloux.

Le calcaire varie de 20,7 p. 100 en surface à 32 p. 100 vers 35 cm mais redescend à 25,7 au-dessus de la tourbe. La variation du calcaire p. 100 du sable fin est caractéristique. De 20 p. 100 en surface cette proportion atteint 40 p. 100 en profondeur pour baisser à nouveau au contact de la tourbe. Il semble que nous nous trouvons là devant le même phénomène de dissolution superficielle constaté dans le méandre de Duclair. Autrement dit, l'irruption de ces 65 cm d'alluvions doit remonter au IIIe siècle après J.-C. et la migration du calcaire doit résulter de 17 siècles de pluies.

La prairie se présente assez bien avec de rares joncs mais une certaine quantité de Trèfle blanc et un peu de Lotier.

Elle a reçu des Scories Thomas et l'analyse révèle une bonne teneur en acide phosphorique. Par contre, la potasse est très basse. Enfin, la magnésie est convenable. Cette analyse prouve que la fumure potassique a été négligée, mais il est facile d'y remédier.

En résumé, l'épaisseur de « sol » est suffisante et la texture est assez bonne pour que l'on puisse soit cultiver, soit faire une prairie de qualité.

Profil D.

La prairie porte le nom de « Pré de la Grange ». Le profil est rapproché de 170 m de la Seine par rapport au précédent. L'altitude est passée à 5 m et le sol est assez ferme pour supporter des bâtiments. Toutefois fin mai 1960, la couche située à 1,20 m était encore très humide et fluante.

Nous sommes hors de la tourbière ou plus exactement les sédiments sont trop épais pour que l'on ait recherché la tourbe en profondeur.

La matière organique n'excède pas 3,50 p. 100 en surface et descend à 1,50 p. 100 vers 40 cm puis 0,50 p. 100 au-dessous.

L'argile, à 10 p. 100 en surface, passe à 17-19 p. 100 en profondeur. Le calcaire passe de 21,8 p. avec une proportion de calcaire dans les sables fins variant de 24,8 p. 100 à 40,6 p. 100 à 1 m. Le lessivage paraît certain pour le calcaire.

Le sable grossier est faible et les cailloux sont absents. Cette prairie, bien fournie en herbe, avec trèfle violet, a été cultivée jusqu'en 1958.

Malgré l'altitude relativement forte pour un bord de Seine, la grande épaisseur de limon très fin (spectres = *wba/aaa* et *vca/aaa*) et la très faible pente fait que la culture en billons s'impose encore. Ils ont ici une largeur de 8 m et la dénivellation entre sommet de billon et fond du fossé est de l'ordre de 30 à 50 cm. Cette disposition a été conservée dans la prairie.

Le pH est de 7,2 à 7,5 en surface et de 7,9 en profondeur.

On remarque une bonne richesse en acide phosphorique mais une carence en potasse. La magnésie est bonne.

Profil E.

Dans ce même pré de la grange, mais à 120 m du profil précédent, en direction de la Seine. Altitude ± 5 m, sans changement.

Le sol contient quelques petits graviers en profondeurs (à partir de 90 cm), mais les sables grossiers restent encore peu importants, de l'ordre de 1 p. 100, et la terre fine est presque aussi fine que dans le précédent profil (spectre sableux = *wca/aa* à *vda/aax*).

Il est possible qu'un premier apport de limon légèrement graveleux par le fleuve ait été suivi d'un lessivage de la terre fine par retrait des eaux, ne laissant en place que des graviers, ultérieurement empâtés dans un apport de limon plus fin. Il est certain que ces lessivages latéraux par extension et retrait du fleuve, ont dû se produire un très grand nombre de fois, en laissant en place les éléments les plus grossiers, qui peuvent ensuite se montrer en discontinuité granulométrique avec l'apport définitif qui se consolide.

La matière organique est à 3,2 p. 100 en surface, 1,4 vers 25 cm et 0, 5 en profondeur. Il est évident que le sédiment récent était pauvre en matière organique, et que la surface s'est rapidement enrichie en humus sous une végétation herbeuse de prairie calcaire souvent humide.

La teneur en argile est relativement faible en surface, 8 p. 100, et n'atteint 12 à 13 p. 100 qu'entre 60 et 70 cm. Elle baisse ensuite jusqu'à 8-10 p. 100.

Le limon est de l'ordre de 11 à 15 p. 100. Les sables très fins varient entre 49 et 56 p. 100. Il n'y a que des traces de sables grossiers.

Tout ceci montre que le sédiment définitif était non grossier, peu argileux et riche en sable fin de 20-50 μ.

Dans ces deux profils du pré de la grange, dès que l'on dépasse la couche superficielle gris-noir, la couleur devient très claire, gris clair ou presque blanc. On remarque, au-dessous de 40 cm quelques faibles marbrures ou taches ferrugineuses, ce qui indique des séjours plus ou moins prolongés des plans d'eau à différentes profondeurs.

Comme pour le profil précédent, l'analyse montre une teneur en acide phosphorique satisfaisante, une bonne teneur en magnésie, mais une pauvreté en potasse.

Profil F.

Ce dernier profil se situe dans la cour de ferme, à environ 30 m de l'ancienne digue et 100 mètres du bord actuel du fleuve, dont nous sommes rapprochés de 60 m par rapport au profil précédent.

Le forage poussé jusqu'à 1,10 m n'a pas rencontré de graviers. La pente rocheuse de l'ancien lit se situe donc beaucoup plus bas et nous sommes restés uniquement dans les alluvions modernes.

La granulométrie est toujours très fine, entre *ufa/aaa* en profondeur et *wba/aaa* en surface. Il se confirme donc que le dépôt qui a recouvert la tourbière était très fin quoique peu argileux.

S'agissant d'une cour de ferme, la matière organique superficielle est assez élevée, 7,8 p. 100 entre 0 et 15 cm et 3,7 entre 15 et 30 cm, mais dès cette profondeur, nous descendons à 0,9 puis à 0,4 entre 65 et 75 cm. Comme pour le précédent profil, nous avons complètement quitté la tourbière et seule la partie superficielle est humifère.

L'argile est à 6-7 p. 100 en surface, 14 p. 100 vers 30 cm pour redescendre à 9-11 p. 100 en profondeur. Le sable très fin est de l'ordre de 48 à 55 p. 100 et le sable grossier de l'ordre de 1 p. 100.

Après une surface grise on passe rapidement au gris-blanc de plus en plus clair. Au-dessous de 60 cm apparaissent quelques marbrures.

Le calcaire total suit toujours la même progression 18 à 20 p. 100 en surface, pas-

sant à plus de 30 p. 100 en profondeur, avec un calcaire p. 100 des sables fins augmentant de 19 à 20 p. 100 jusqu'à 36 p. 100 ce qui s'explique par un net lessivage.

Cette cour de ferme, plantée en pommiers, pruniers, cerisiers, bigarreautiers, reçoit du purin tous les ans et 400 kg d'engrais complet PEC 10-10-20, aussi elle est fortement enrichie.

L'acide phosphorique est très élevée en surface et assez fort jusqu'à 30 cm. La potasse est élevée et la magnésie est très satisfaisante. L'herbe est abondante et nutritive.

Notons que les cerisiers viennent mieux sur l'ancienne digue, caillouteuse, un peu plus élevée et drainant mieux.

Teneurs en soufre des sols examinés

Nous avons spécialement recherché pour cette étude, quelles étaient les teneurs en sulfates et en soufre organique.

En effet, de précédentes détermination sur des sols d'alluvions modernes de la vallée de la Seine nous avaient montré que cet élément ne manquait pas. Rappelons brièvement notre mode opératoire :

Mode opératoire.

1° *S des sulfates solubles eau.*

50 g de sol sont lessivés par 250 ml d'eau pure (déminéralisée). Le liquide clarifié par centrifugation en présence d'alumine pure ou de charbon actif pur est additionné sur une partie aliquote d'acide chlorhydrique et d'une quantité mesurée d'une solution à 10 p. 100 de $BaCl_2$ tweené, c'est-à-dire contenant une certaine proportion de tween 20 destiné à empêcher le grossissement et la sédimentation des cristaux de sulfate de baryum.

On mesure l'opacité de la suspension de sulfate de Ba par rapport à une solution des réactifs purs dans la région basse du spectre visible, par exemple à 400 mμ.

Pour une concentration de 0 à 200 γ de S dans 500 ml la courbe étalon est une droite.

Si le sol est humifère, la solution extraite est colorée par de la matière organique, plus ou moins soufrée. On évalue ce soufre organique soluble après un traitement approprié par H_2O_2.

2° *S organique solubilisé par l'eau oxygénée*:

On reprend une partie du sol lessivé à l'eau et on le sèche complètement à l'étuve à 103°.

On attaque à douce ébullition 1 g de sol sec par H_2O_2 concentrée dans un bêcher couvert d'un verre de montre.

On prolonge l'attaque quelques heures jusqu'à décoloration complète du liquide surnageant. Après centrifugation, on jauge et prélève une partie aliquote pour terminer le dosage par néphélométrie comme précédemment.

Pour les sols très humifères, il est bon de faire une seconde attaque sur le culot de centrifugation.

3° *Soufre solubilisé par l'acide chlorhydrique.*

Le culot restant après attaque par l'eau oxygénée est repris par 5 ml d'acide chlorhydrique pur (12 N) additionné de 15 à 20 ml d'eau pure, dans un bêcher couvert d'un verre ce montre. On porte environ 20 minutes à douce ébullition, jusqu'à décoloration complète du sol.

On filtre, on évapore à sec pour insolubiliser la silice. On reprend par de l'eau faiblement acidulée. Le liquide est généralement fortement coloré en jaune-brun par du chlorure de fer. On passe sur une petite colonne de résine cationique H^+ qui retient le fer et les autres cations. On lave.

L'effluent est amené à volume connu. On prélève une partie aliquote et l'on termine par néphélométrie comme ci-dessus.

4° Si la terre est fortement calcaire, on constate que le sol traité par HCl livre encore une petite quantité de soufre par une attaque complémentaire à l'eau oxygénée.

La somme des quantités de soufre livré par les attaques précédentes n'est pas forcément égale au soufre total obtenu par combustion en présence d'oxydant dans un tube de quartz mais on peut penser que cette somme représente un maximum de ce que les plantes pourraient tirer du sol.

ésultat.

On trouve que les quantités de sulfates solubles à l'eau sont assez variables, en articulier elles sont fonction des engrais sulfatés. Ces quantités sont également ariables en fonction de la profondeur et des périodes de l'année. Quant au soufre rganique, il est, comme l'azote, en corrélation assez étroite avec le taux de matière rganique du sol.

Le tableau ci-après fournit les valeurs trouvées dans la chaîne de sols d'Heur-eauville.

TABLEAU I

N° de recherches	Prof. cm	Mat. org. %	Azote (°/oo)	S soluble eau p. p. m.	S organique (H_2O_2) p. p. m.	S résiduel partiel p. p. m.	S seconde attaque H_2O_2 p. p. m.	S total des attaques p. p. m.	CO_3 CA (%)	pH eau
R 2169 ..	0/15	42,5	13,66	81	3 600	40	60	3 761		6,1
R 2171 ..	0/15	27,5	10,91	47	1 520	80	44	1 691		6,8
R 2172 ..	15/35	18,5	6,49	57	1 320	48		1 425		7,1
R 2173 ..	35/60	68,5	15,5	130	4 200	120		4 450		6,8
R 2174 ..	0/12	15,2	6,47	30	850	96		976	20,7	
R 2175 ..	12/27	13,0	4,09	14	260	128		402	25,7	
R 2178 ..	56/68	2,95	1,05	17	166	210		393	25,7	
R 2180 ..	0/12	3,50	1,31	9	208	193		410	21,8	
R 2181 ..	12/27	2,35	1,12	3	108	106		217	22,6	
R 2186 ..	98/114		0,40	22	82	212		316	31,4	
R 2196 ..	0/12	7,9	2,99	113	330	108		551	18,0	
R 2197 ..	12/30	3,7	2,15	64	158	58		278	20,5	
R 2202 ..	90/102		0,27	188	38	210		436	29,1	

Nous pouvons comparer ces résultats à ceux obtenus sur des sols de prairie de Basse-Seine de la région de Lillebonne, qui n'ont pas encore été publiés.

TABLEAU 2

N° de recherches	Prof. cm	Mat. org. (%)	S soluble eau p. p. m.	S organique (H_2O_2) p. p. m.	S résiduel (HCl) p. p. m.	S seconde attaque H_2O_2	S total p. p. m.	CO_3Ca (%)	Observations
R 2549 ...	0/17	6,1	6	336	40	67	449	20,4	
R 2550 ...	20/43	2,6	7	27	207		241	25,0	
R 2553 ...	83/108	0,7	8	48	325		381	31,0	
R 2555 ...	0/12	10,4	13	573	100		686	20,0	
R 2556 ...	18/36	1,8	3	108	80		191	24,2	
R 2561 ...	0/15	12,6	40	690	250	49	1 029	17,6	
R 2562 ...	15/36	1,9	3	114	147	19	283	26,0	
R 2566 ...	96/116	1,0	6	97	280		383	30,6	

Si l'on construit un graphique : soufre organique p. p. m. (H_2O_2) en fonction du taux de matière organique p. 100 de terre fine sèche, on constate que les points se groupent en majorité le long d'une droite passant par l'origine et telle que 1 p.100 de matière organique fournisse 60 p. p. m. de soufre.

Pour les sols peu tourbeux, le rapport serait plutôt 55 p. p. m. pour 1 p. 100.

Quelles que soient les raisons pour lesquelles certains sols sont plus ou moins riches que ne l'indique la moyenne par rapport à la quantité de matière organique présente, il ressort de ces résultats que les sols humifères de la vallée de Seine sont bien pourvus en soufre et dès que le moindre travail cultural est appliqué au sol la destruction de la matière organique livre aussitôt une assez forte quantité de soufre soluble à l'eau.

Il s'agit donc d'un milieu où les plantes ne sont pas carencées en cet élément.

VOCATION AGRONOMIQUE DES SOLS HUMIFÈRES DE LA RÉGION D'HEURTEAUVILLE

La chaine de sols du terroir étudié comporte des possibilités successives que nous allons maintenant exposer.

Auparavant montrons comment ces sols étaient exploités jusqu'à une date récente.

Utilisation du terroir avant 1914

Ce qui caractérise l'exploitation de cette région, à la fin du XIXe siècle et au début du XXe, est l'entretien de nombreux fossés qui assainissent suffisamment pour que des prairies sur tourbe, aujourd'hui peu praticables, aient été régulièrement pâturées et fauchées et que des sols utilisables seulement aujourd'hui en prairies naturelles aient été cultivés en céréales (blé-avoine) et plantes sarclées : racines et tubercules.

Il n'y avait pas d'apport d'engrais, mais bien entendu, le fumier était porté sur les soles cultivées.

On n'apportait pas non plus d'amendements car les cultivateurs savaient, par routine, qu'il n'y en avait pas besoin.

Les rendements étaient assez faibles (voir des ordres de grandeur dans notre étude sur le terroir de la région de Duclair, 1959). Mais la faiblesse des rendements était alors générale en France et provenait pour une grande part des variétés utilisées, peu productives et du niveau assez bas de la fertilité chimique, notamment en acide phosphorique et en potasse.

Par ailleurs, on a toujours été obligé de faire une distinction entre les prairies sur tourbière, profil A, plus ou moins inondées en hiver, même quand les fossés étaient entretenus ; les prairies et cultures sur terrains intermédiaires, profils B, C, D, plus proches de la Seine un peu plus élevés et avec sol sur alluvions modernes calcaires de plus en plus épaisses ; enfin les banquettes latérales : profils E et F, ne mouillant qu'exceptionnellement certaines années, entièrement sur alluvions modernes peu argileuses. Ce sont sur ces derniers sols que sont établis les bâtiments plus ou moins vétustes de la ferme ou plutôt de la fermette car il s'agit de petits cultivateurs, peu fortunés. Même quand l'espace nominal est assez grand, par exemple quelques dizaines d'hectares, les fossés, les parties tourbeuses et broussailleuses, etc. réduisent fortement la surface utile.

C'est également sur la banquette latérale que se trouvent les cours de ferme et prés-vergers surpeuplés depuis des siècles en cerisiers, bigarreautiers, pommiers à cidre, pommiers à couteau, poiriers sur francs... le tout en hautes tiges. C'est surtout grâce à ces arbres fruitiers que les cultivateurs pouvaient se faire un peu d'argent liquide, en vendant leurs produits dans les bourgs et les villes du plateau les plus proches et, en partie, à Rouen.

DE 1914 A 1945

La région étudiée n'a que peu progressé entre les deux guerres mondiales. On peut même dire que la situation des prairies basses a empiré du fait de l'envasement des fossés. En particulier, le grand collecteur qui se trouve dans une vaste propriété n'ayant aucun intérêt agricole (chasse...) n'est pas entretenu, ce qui stérilise les efforts individuels des cultivateurs qui veulent tenir leurs canaux en état.

Toutefois, un peu d'engrais, notamment des scories, a été timidement utilisé et surtout un mouvement assez important de surgreffage de pommiers à cidre en variétés de pommes à couteaux (*Boskoop, Bénédictin...*) a été démarré sous l'influence de quelques promoteurs comme M. Le Graverend, ancien Directeur des Jardins de la ville de Rouen et M. Quevaine, Conseiller fruitier du Département.

Voici comment se présentait la situation agronomique dans une grande ferme d'Heurteauville avant la seconde guerre mondiale.

Prairies sur profil A.

Inondées de 4 à 6 mois, faible exploitation, dépendant des conditions de l'année. On ne peut plus utiliser la faucheuse.

Prairies sur profil B.

Fond un peu plus ferme mais situation d'exploitation voisine de celle des prairies A.

Prairies sur profil C.

Mouillées de 3 à 4 mois par an. La culture est devenue impossible, sauf dans les parties les plus sèches.

Prairies sur profil D.

Ce terrain ne baigne plus en hiver, mais la culture en billon est indispensable, et l'eau peut séjourner dans les raies pendant la mauvaise saisons.

C'est sur ces terrains D et E que s'effectuait presque toute la culture de la ferme. L'assolement était biennal : céréales (3/4 Blé + 1/4 Avoine) sur la sole A et légumes (3/4 haricots à écosser + pommes de terre + betteraves fourragères + carottes rouges ou blanches) sur la sole B.

Bien entendu, au cours des rotations successives sur la même sole, on s'efforçait de ne pas faire revenir la même culture deux fois à la même place.

Prairies sur profil E.

Ce terrain, prolongement du précédent est un peu plus sec et comme déjà dit, était soumis à la culture comme en D.

Cours et prés vergers, profil F.

Cette bande de terrain, d'une largeur moyenne de 150 mètres à Heurteauville, ne baigne pas, mais le sous-sol reste humide une grande partie de l'année, ce qui présente un inconvénient pour certains arbres, ainsi que nous le verrons ultérieurement

Elle était (et est encore) surpeuplée d'arbres à fruits à noyaux et à pépins.

Voici une composition classique de cour et pré verger dans la ferme prise comme exemple. Sur une suface de 4,50 ha on trouve :

340 pruniers — 30 cerisiers et bigarreautiers,

140 pommiers à couteau (en majeure partie provenant de surgreffages) et 70 pommiers à cidre, ce qui fait un total de 550 arbres de grosseurs diverses (remplacements) et peu ordonnés (remplacements entre les rangées primitives, vides par pertes par pourridié, etc.).

En général les pruniers sont plantés à 5 ou 6 mètres d'intervalle et les cerisiers et bigarreautiers à 10-15 mètres.

Tout ceci est appelé à se transformer, à se rationaliser, dans un avenir plus ou moins lointain, ainsi que nous l'exposerons ci-après. Voici encore quelques renseignements sur l'utilisation du terroir.

Signalons d'abord qu'il n'existe pas de prés communaux, non plus qu'au nord sur la commune voisine de la Mailleraye-sur-Seine. C'est une différence avec la région de Duclair précédemment étudiée.

Par ailleurs, les terres de la Mailleraye plus étroites entre collines et Seine et plus inondées avaient un système de culture plus étriqué. On n'y cultivait pas de haricots ni de carottes maraîchères. Enfin l'asphyxie des racines d'arbres fruitiers est plus à craindre.

Les transformations actuelles et l'avenir agronomique de la région d'Heurteauville

Les régions bordières de la Basse-Seine, longtemps isolées et déshéritées, principalement sur la rive gauche et aux extrémités des méandres à l'écart des grands chemins de communication, sont actuellement en voie de lente rénovation.

Les efforts conjugués de la Station agronomique de Rouen, qui, depuis quelques années, par ses études de base, reconnaît et classe les différents sols du terroir, ceux de la Direction des Services Agricoles de la Seine-Maritime, et surtout ceux du Centre agricole post-scolaire de Saint-Pierre-de-Varengeville, maintenant Centre Cantonal d'Enseignement agricole et de Vulgarisation de Duclair, commencent à retourner la situation agronomique dans ces régions.

Tous ces organismes travaillent la main dans la main, et l'on peut espérer qu'au fur et à mesure que fera son œuvre l'expérimentation et l'exemple des cultivateurs les plus avancés joint à l'enseignement, les meilleures méthodes d'utilisation du terroir seront progressivement appliquées.

Voici, basé sur les travaux de la Station agronomique de Rouen, ainsi que sur les essais et la connaissance profonde qu'a de la région, M. Carré, directeur du Centre de Duclair, comment on peut envisager la transformation et l'avenir de ces bords de la Basse-Seine.

Prairies A

Le but est de rendre à ces prés leur accessibilité d'antan tout en les améliorant par des engrais adéquats.

Il faut pour cela obtenir des personnes responsables le réélargissement à 4 mètres du fossé de ceinture, actuellement souvent réduit à 2,50 par l'éboulement des berges, et son approfondissement à 1,50 au moins, alors qu'il présente actuellement de nombreux fonds inférieurs à 50 cm.

Quand ce travail sera fait, les cultivateurs pourront valablement dégager leurs propres fossés et drainer ainsi les prairies en dehors des périodes de fortes pluies. Ceci permettra l'utilisation de machines agricoles simples et légères telles que herses, semoirs d'engrais et faucheuses.

Au point de vue fertillisation, on continuera l'apport d'acide phosphorique et on utilisera beaucoup de potasse qui fait partout défaut. Dans les prairies un peu acides, les scories potassiques et engrais binaires analogues sont tout indiqués. Par contre, les fumures azotées, sauf peut être pour un démarrage rapide (nitrates), ne paraissent pas indispensables.

L'engrais PK pourra être au besoin apporté au printemps dès l'assainissement de la prairie si l'on craint un petit entraînement de la potasse.

L'élevage du cheval de boucherie paraît être une bonne spéculation pour ce genre de prés tourbeux.

Prairies B

Ces prairies, un peu plus fermes que les prairies A sont justiciables des mêmes améliorations. Elles pourront servir alors de bonnes prairies naturelles pour les bovins, notamment en été car le sol reste assez frais par suite de la proximité de la tourbe plus ou moins aqueuse.

Prairies C

Nous sommes à la limite de la tourbière. La tourbe est recouverte de quelques décimètres d'alluvions et de ce fait, le sol devient cultivable. Mais sa vocation est encore nettement prairiale. C'est donc des prairies temporaires qu'il convient de créer et d'entretenir.

D'après les indications du Laboratoire de Recherches sur les Plantes fourragères de Rouen et les essais du Centre agricole de Duclair, il se trouve que la Fétuque des prés, accompagnée d'un peu de Trèfle blanc est la meilleure graminée adaptable au terroir.

Selon M. Carré, le Lotier des marais constituerait une excellente légumineuse à associer aux graminées. Malheureusement sa graine est rare et chère.

Dans les parties les moins humides, mais restant fraîches, la Fléole peut prendre une bonne place. Enfin quelques parcelles en Dactyle, laquelle est la variété présentant le plus de diversité dans la précocité ou la tardivité, permettrait d'établir des chaînes de pâturage aussi complètes que possible.

Les prairies temporaires dont le rendement est au moins double des prairies permanentes améliorées, permettraient soit d'augmenter le cheptel, soit plus rationnellement d'étendre les surfaces cultivées en Maïs et en arbres fruitiers.

La race laitière est toujours la race Normande. Il n'y a pas lieu d'en changer à condition d'utiliser des animaux toujours améliorés, capables de rentabiliser la meilleure nourriture que l'on produira dans l'avenir. C'est maintenant assez facile grâce à l'insémination artificielle.

Le Maïs grain apparaît la culture la plus rentable pour alterner avec les prairies temporaires. On peut aussi faire du Maïs fourrage, à ensiler à l'état grain pâteux presque mûr.

La culture du Maïs n'est devenue possible et intéressante que depuis l'apparition des variétés très précoces. Sur le terroir étudié, la meilleure variété est actuellement *INRA 200*. Avec cette variété le grain est toujours récoltable et les rendements, en terre bien fumée (veiller à la potasse) atteint 60 à 75 quintaux. Ceci est dû en particulier à la fraîcheur permanente du sous-sol.

On sème entre le 15 et le 25 mai. On récolte fin octobre, rarement début novembre (années humides).

Il est possible de faire jusqu'à 4 fois Maïs sur Maïs après une prairie temporaire, ce qui est très avantageux.

Une grande partie du grain peut être utilisée localement et le reste vendu dans un court rayon. Il s'agit en effet d'un petit grain rond, jaune, très apprécié par les volailles.

A noter que la commune voisine de La Mailleraye, à terres plus noyées, doit semer son Maïs un peu plus tardivement, soit fin mai.

L'Orge est encore assez cultivée, mais se révèle moins intéressante que le Maïs qui est la céréale d'avenir sur le terroir.

L'Avoine a perdu beaucoup de son importance depuis la mécanisation.

Quant au Blé, il est absolument à déconseiller. Le Blé d'hiver baigne dans l'eau pendant une partie de l'année et dépérit. Le Blé de printemps doit être semé trop tardivement et en terre trop lourde. Ceci est encore plus vrai au nord d'Heurteauville sur la commune de La Mailleraye.

Les cultures légumières

Bien entendu, là où la culture légumière est fructueuse, haricots, carottes... il n'y a pas lieu de la délaisser, mais on doit au contraire la fumer soigneusement en tenant compte de la richesse du sol.

Dans ce cas, elle prendra une ou deux places dans la rotation avec Maïs.

La culture fruitière

Nous avons vu que la vallée de Basse-Seine et en particulier les alluvions moderne des régions de Duclair, Jumièges, Heurteauville, Yainville, etc. se prêtaient très bien à la culture des arbres à noyaux et à pépins, et que les récoltes assuraient une rentrée d'argent intéressante.

En effet, cette vallée est abritée des vents violents et froids. Les écarts de température sont restreints. L'humidité de l'air est régulière et celle du sol fait rarement défaut. Il y a un ensoleillement convenable en belle saison. On constate donc là une réelle vocation fruitière.

Il convient d'une part de rationaliser la production fruitière, compte tenu des

connaissances modernes, d'autre part d'étendre les surfaces grâce à la libération d'anciennes prairies permanentes, assainies, fertilisées et transformées en prairies temporaires et en cultures.

Là encore, le Centre agricole de Duclair a joué un rôle primordial dans la transformation en cours.

Voici les conseils de modernisation que l'on peut donner actuellement :

Banquette bordière, profil F.

A partir du chemin de halage sur une largeur d'environ 150 mètres au droit du Centre d'Heurteauville.

C'est la terre la plus saine, au sous-sol le moins asphyxiant pour les racines d'arbres fruitiers.

On plantera des cerisiers sur merisiers et des pruniers sur myrobolan.

Il faut absolument proscrire le porte-greffe *Sainte-Lucie* pour les cerisiers. Le sol est encore trop lourd et trop humide une grande partie de l'année. Les racines sont attaquées par le pourridié et un verger nouvellement planté disparaît complètement en quelques années.

De même, le franc et le *Saint-Julien* sont à proscrire pour le prunier, toujours à cause de l'asphyxie des racines.

Enfin on plantera sur billons avec dérayure profonde de 25 à 30 cm, après une bonne préparation du sol et apports des engrais indiqués par le laboratoire, compte tenu de la richesse préexistante et de la nature calcaire (20 p. 100 CO_3Ca en surface, 25 p. 100 dans le sous-sol immédiat.)

Notons que la proximité de la tourbière d'Heurteauville, en activité à quelques centaines de mètres de la Seine, fournit un excellent moyen d'alléger le sol, de le rendre plus poreux, de lui permettre de conserver de l'eau pendant les étés très secs, de contrebalancer partiellement l'alcalinité due au calcaire. Tous les arboriculteurs qui ont mélangé une bonne quantité de tourbe aux sols d'alluvions modernes en sont enchantés. Mais malgré le court transport, la quantité minimum à employer pour constater un effet, de l'ordre de 1000 m^3 à l'hectare, rend cependant cette amélioration coûteuse, même si le cultivateur possédant une prairie tourbeuse, peut l'extraire sur son propre fond.

Les demi-tiges seront généralement achetées formées, après deux ans de greffe en tête à 1,50 mètre. On peut aussi utiliser des gobelets.

L'écartement sera de 6,50 à 7 m avec alternance des pruniers et des cerisiers. On plante en carré. On ne se préoccupe pas de la pollinisation, l'expérience ayant montré qu'elle était toujours assurée avec les variétés utillisées.

Dans ces conditions un prunier rapporte au bout de 4 à 5 ans et un cerisier au bout de 7 ans.

Les variétés sont telles que l'on soit assuré d'une succession des récoltes et bien entendu que les fruits soient attrayants, résistants, etc. enfin que l'arbre demeure vigoureux le plus longtemps possible (quelques dizaines d'années).

En ce qui concerne les cerisiers (ou plutôt les bigarreautiers) on a la succession ci-après :

Early Rivers (guigne précoce, fin mai, à chair ferme, bien colorée) puis les bigarreautiers : *Burlat, Moreau, Napoléon, Hedelfingen,* le plus tardif : mi-juillet.

On pourrait aussi utiliser *Jaboulay, Pélissier et Reverchon.*

Pour les pruniers, toujours par ordre de maturité de plus en plus tardive, on utilisera :

Verte bonne de juillet (mi-juillet), *Reine-Claude dorée, Reine-Claude verte bonne, Belle de Louvain, Reine-Claude d'Oullens* et enfin *Kirke* : fin août.

De plus, on prévoiera 5 p. 100 de mirabelliers (en petite Mirabelle d'Alsace) dont les petits fruits jaune d'or marbrés de rouge, à chair tendre, sucrée et parfumée trouvent facilement preneur dans la deuxième quinzaine d'août.

Toutes ces variétés sont décrites dans l'important ouvrage de la Société Pomologique de France « Le Verger Français » 1948.

Arrière banquette.

De 150 à 350 mètres de la Seine environ, à Heurteauville. Profils E à D.

Pommiers. — C'est la zone des vergers de pommiers basse-tiges dont les porte-greffes peuvent un peu mieux résister à une asphyxie momentanée toujours à craindre tant que les fossés ne seront pas entièrement rénovés.

Il faut cependant s'assurer que le terrain est suffisamment sain. Sur la ferme d'avant-garde qui nous a servi de modèle, il existe 4 km de fossés, petits et grands, sur une surface totale de 56 hectares. C'est une lourde tâche pour l'agriculteur que d'en remettre chaque année une fraction en état.

Après retournement de la prairie, incorporation d'engrais de fond, conditionnement en larges billons en rapport avec l'écartement adopté pour les arbres, on plante des scions d'un an greffés.

Bien que le porte-greffe *E M IX* ait une grande faveur, à cause de sa mise à fruit rapide et de l'aspect avantageux des fruits, il est préférable de fixer son choix sur un porte-greffe plus vigoureux, dont le développement supérieur compense largement 2 ou 3 ans de retard et dont la moindre quantité de pieds à l'hectare n'exige qu'une faible mise de fond (par exemple 1/3 en moins que dans le cas du IX).

L'un des meilleurs porte-greffe pour le terroir étudié est le *Merton immune n° 111* qui a la vigueur de l'*E M VII* et sans doute se révèlera un peu plus productif. Comme son nom l'indique il résiste au puceron lanigère.

On peut le remplacer par le *Merton 106* intermédiaire entre le II et le VII, mais sans doute moins productif que le *111*.

On plantera par exemple à 4,50 m sur la ligne et à 6 m entre les lignes, ce qui donne 370 arbres à l'hectare. Après 4 ou 5 ans, la production dépassera déjà celle des variétés greffées sur type IX. Après 6 ou 7 ans on peut espérer avoir une moyenne de 30 t/ha avec des pointes de 50 à 60 t.

La formation sera le buisson ou le gobelet différé.

Les variétés à conseiller sont :

Starkearliest (très précoce) ; *James Grièves* (précoce) ; *Golden delicious* (le plus gros tonnage) ; *Reine des Reinettes* (une bonne proportion) ; *Belle de Boskoop*, et en quantité moindre : *Bénédictin*, variété locale très appréciée, mais de mise à fruit tardive et un peu irrégulière et *Bailleul*, autre variété locale, très vendable en Seine-Maritime et convenant très bien pour les beignets.

On peut ajouter : *Cox-Orange* ; *Stayman Red* ; *Starking delicious* ; *Richardred*. Par contre il convient de proscrire *Jonathan*, très sensible à l'oïdium.

Poiriers. — La forte teneur en calcaire condamne irrémédiablement tout verger commercial de poirier sur cognassier. La chlorose est fatale au bout de peu d'année.

Par contre pour le jardin familial, on peut remplacer largement la terre des plates bandes par de la tourbe acide et traiter en outre le sol par un chélate de fer moderne, tel que celui dérivant de l'EDDHA : acide éthylène diamine di (*o*-hydroxyphényl acétique) — (séquestrène).

Le prix de revient n'étant pas dans ce cas un obstacle.

Petits fruits. — On peut peupler certaines parcelles exiguës par des framboisiers ou des groseilliers, dont les fruits se vendent bien en saison. Cette spéculation étant très restreinte, on manque encore de renseignements sur les meilleures variétés à utiliser.

Par ailleurs, les fraisiers qui redoutent assez le calcaire pourraient être placés en bordure de la tourbière.

CONCLUSION

Au cours de cette étude sur un terroir un peu particulier, constitué par une chaîne de sols passant de la tourbière presque pure aux alluvions modernes très fines et très calcaires, nous avons pu mettre en évidence des bandes successives de terrains parallèles au fleuve, dont les vocations agronomiques sont bien précises.

Cette région de la Basse-Seine avait peu évolué jusqu'à ces dernières années et était restée relativement pauvre.

Grâce aux efforts conjugués des services scientifiques de l'I. N. R. A., des services techniques directement ou indirectement reliés à la Direction des Services agricoles de la Seine-Maritime, grâce aussi aux efforts des agriculteurs d'avant-garde, il a été possible de définir une politique de transformation qui commence à porter ses fruits et qui garantit un meilleur avenir.

La meilleure récompense que puisse obtenir un service officiel comme celui de la Station agronomique de Rouen est le sentiment d'avoir participé activement à cette transformation.

Reçu pour publication en juin 1962

SUMMARY

THE SOILS AND AGRICULTURE IN THE HUMIFEROUS REGIONS OF THE LOWER-SEINE VALLEY

This third and last communication on the soils of the Lower-Seine Valley deals with a catena type of humiferous soils on fine calcareous-clay deposited as alluvia in the Valley, from mesotrophic peats of the lower regions to calcareous soils well provided with humus at higher situations on the river shores.

Physical and chemical data of six profiles of the catena are given, and the potentialities and agricultural use of the soils are discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE BÖDEN UND DIE LANDWIRTSCHAFT DES HUMOSEN BASSE-SEINE-TALES.

In dieser dritten und letzten Mitteilung der den Böden des Basse-Seine-Tales gewidmeten Serie wird eine typische Kette humoser, homolithischer Böden auf feiner kalklehmiger Anlagerung der Talaufschüttung untersucht, beginnend mit dem merotrophen Torfe der unteren Partie bis zu den mit Humus normal versorgten höher gelegenen Kalkböden des Flussgebietes.

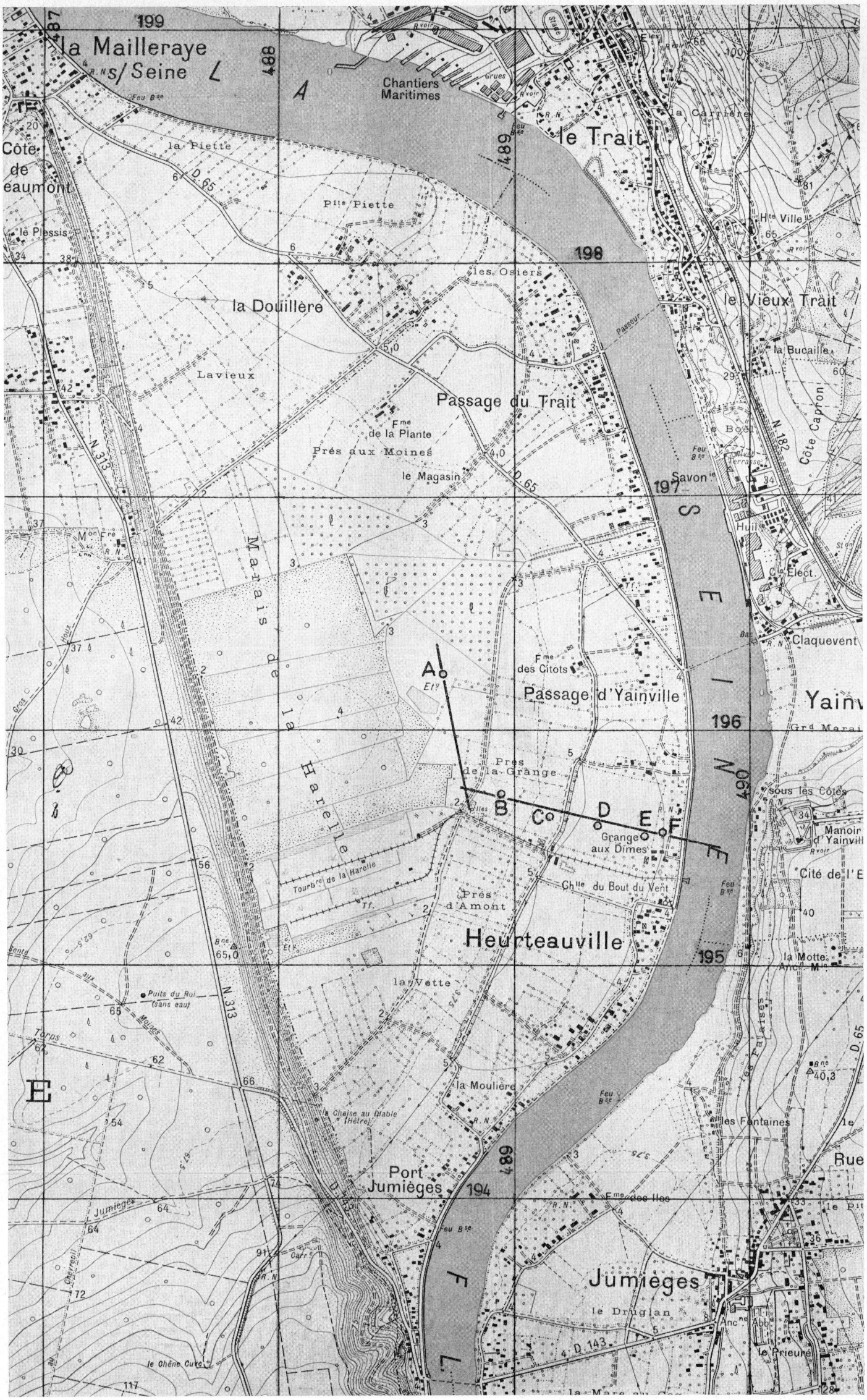
Nach Darstellung der Resultate granulometrischer und chemischer Analysen der sechs Profile dieser Kette, werden die landwirtschaftliche Bestimmung und Benutzung dieser Böden herausgestellt.

Почвы богатых гуммусом земель нижней Сены и их агрикултура.

Э. ЖУИ и Мария-Тереза ЛЕКАШЁ (Руан).

В этой третьей и последней статье серии посвященной почвам долины Нижней Сены анализируется ряд типичных, однородных в смысле материнской породы, гуммусовых почв, нанесенных в долину на глинисто-известковые отложения, начиная от меротрофных торфяников нижних слоев и кончая известковыми прибрежными почвами содержащими нормальные количества гуммуса.

После отчета о результатах гранулометрических и химических анализов шести различных профилей ряда, в статье разбирается возможность использования в настоящем и агрономическое будущее этих почв.



(Reproduction de carte de l'Institut géographique national)

Ann. agron., 1963, **14** (1), 31-117

631. 414. 2 — 1. 437

MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE : LES COMPLEXES ORGANIQUES DES ARGILES

R. CALVET

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

La structure et les principales propriétés des argiles sont rappelées, et quelques notions relatives aux méthodes d'études physiques utilisées sont données.

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer la formation des complexes organiques des argiles :
— échange ionique,
— adsorption physique,
— réactions chimiques.

La structure des complexes est envisagée ainsi que leurs propriétés et leurs applications.

PLAN

INTRODUCTION.

PREMIÈRE PARTIE.

Chapitre I — Structure et propriétés des argiles.

I — Structure.
II — Propriétés de surface.
III — L'eau dans les argiles

Chapitre II — Méthodes d'étude.

I — La diffraction des rayons X.
II — La spectroscopie infrarouge.

DEUXIÈME PARTIE : FORMATION DES COMPLEXES ORGANIQUES DES ARGILES.

Chapitre I — Complexes formés à partir des molécules ionisées.

I — L'échange ionique est seul ou dominant.
II — L'échange ionique est accompagné d'un autre phénomène.
III — Conclusion.

Chapitre II — Complexes formés à partir des molécules non ionisées.

I — Adsorption interlamellaire.
II — Les mécanismes de formation des complexes.
III — Conclusion.

Chapitre III — Formation des complexes par réaction chimique.

I — Réactions chimiques avec la surface des argiles.
II — Inexistence des réactions chimiques.

TROISIÈME PARTIE : LA STRUCTURE DES COMPLEXES ORGANIQUES.

I — Les distances interatomiques et la configuration moléculaire.
II — Les structures.
III — Nature des couches moléculaires adsorbées.
IV — Conclusion.

QUATRIÈME PARTIE : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS DES COMPLEXES ORGANIQUES DES ARGILES.

I — Propriétés des complexes organiques des argiles.
II — Applications.

CONCLUSION.

INTRODUCTION

Les interactions entre les corps organiques et les argiles ont été soupçonnées depuis longtemps. Les propriétés adsorbantes de certaines terres ont conduit à penser qu'elles pouvaient fixer les substances au contact desquelles elles se trouvaient. Les différents aspects de ce phénomène apparaissent progressivement.

John Uri Lloyd (1910) observa la rétention des alcaloïdes. Demolon et Barbier (1929) montrèrent la fixation des acides humiques et des protéines. Mattson (1932), Smith (1934) firent de semblables observations. Cependant, ce n'est qu'assez récemment que de nombreux chercheurs essayèrent de définir les conditions de formation des complexes organiques des argiles, ainsi que leur structure. Étant donné l'incertitude des connaissances quant à la nature des corps organiques du sol, les études ont surtout porté sur des molécules simples dont la constitution était parfaitement connue. Il en résulte que de nombreux travaux se rapportent à des corps dont la présence dans le sol n'est absolument pas prouvée. En outre, les expériences effectuées le sont dans des conditions souvent très éloignées des conditions naturelles. Par conséquent, les résultats auxquels celles-ci ont abouti sont difficilement applicables à l'étude du sol. Néanmoins, elles permettent d'approcher le problème du comportement des corps organiques au contact des argiles et permettront certainement d'approfondir les propriétés du complexe argilo-humique quand son étude sera plus avancée. Elles présentent aussi l'intérêt de mettre en évidence certaines propriétés de la surface de l'argile.

Dans ce travail bibliographique, nous aborderons l'étude de la formation de ces complexes, puis de leur structure et de leurs propriétés. Cependant, nous parlerons d'abord des caractéristiques essentielles des argiles et des techniques utilisées.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE I

STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS DES ARGILES

Nous ne donnerons que les caractéristiques essentielles des principales structures, tout en insistant davantage sur les points qui intéressent directement la formation des complexes organiques.

La montmorillonite surtout, fera l'objet de ce chapitre car c'est un des minéraux les plus étudiés. Nous n'envisagerons pas non plus toutes les argiles, mais nous nous bornerons aux types suivants : montmorillonite, kaolinite, halloysite, vermiculite.

I — Structure

A. — Montmorillonite

1. — *Structure selon* Hofmann, Endel *et* Wilm

Cette structure découle des suggestions faites par ces auteurs en 1933, récemment modifiées par Maegdefrau, Hofmann, Marshall et Hendricks (réf. cit. in Grim 1953 *a*).

La montmorillonite est constituée d'unités faites de 2 couches tétraédriques de silicium et d'une couche centrale octaédrique d'aluminium. Ces couches sont combinées de sorte que les sommets de chaque tétraèdre de silicium (atome d'oxygène) et un des plans d'hydroxyles de la couche octaédrique se situent dans un plan commun. Les couches sont continues dans les directions x et y et empilées les unes sur les autres dans la direction z (fig. 1).

Dans l'empilement des unités Si-Al-Si (1 feuillet), les couches d'oxygène d'unités voisines sont adjacentes. Il en résulte un lien très faible entre elles, d'où un excellent clivage. L'épaisseur du feuillet est de 9,6 Å mais la distance basale peut varier. Nous verrons comment on peut la mesurer.

Notons enfin que les (OH) de la couche octaédrique sont placés directement en dessous des cavités hexagonales du réseau d'oxygène de la couche tétraédrique. Ce détail de structure est important, comme nous aurons l'occasion de le voir.

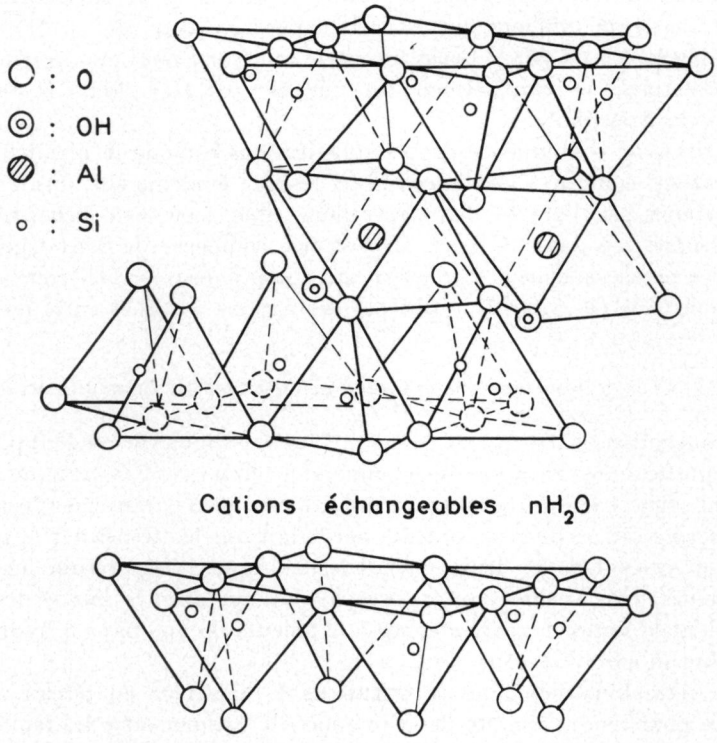


FIG 1. — *Structure de la montmorillonite d'après* HOFMANN, ENDEL, WILM (*in* GRIM, 1953 *a*)

La formule théorique est $(OH)_4Si_8Al_4O_{20}$, n (H_2O), l'eau se trouvant entre les feuillets. La composition théorique du réseau est alors.

SiO_2	:	66,7 %
Al_2O_3	:	28,3 %
H_2O	:	5 %

A cette formule théorique correspond une répartition des charges qui réalise l'électroneutralité du système :

$6O^{--}$	12 (—)
$4\ Si^{4+}$	16 (+)
$4O^{--}2(OH)^{-}$	10 (—)
$4\ Al^{3+}$	12 (+)
$4O^{--}2(OH)^{-}$	10 (—)
$4\ Si^{4+}$	16 (+)
$6O^{--}$	12 (—)

MARSHALL et HENDRICKS ont insisté sur le fait que la montmorillonite était toujours différente de la formule théorique en raison des substitutions isomorphiques.

L'aluminium et peut-être le phosphore peuvent remplacer le silicium dans la couche tétraédrique, le magnésium, le fer, le zinc, le nickel et le lithium peuvent remplacer l'aluminium dans la couche octaédrique.

Ces substitutions sont d'une importance variable. Elle se traduisent parfois par un arrangement différent du réseau (par exemple avec Mg^{2+} et Fe^{3+} en raison de leurs diamètres), ou par la constitution de minéraux nouveaux quand elles sont totales. Exemples : le remplacement total de Al^{3+} par Mg^{2+} donne la Saponite, par Fe^{3+} donne la Nontronite.

La principale conséquence de ces substitutions est que le réseau n'est jamais électriquement équilibré. Ce déséquilibre résulte évidemment du remplacement de certains ions par d'autres, de valence plus faible, dans les couches tétraédriques ou octaédriques, ou dans les deux. Il peut être compensé de deux façons : soit en partie, et en partie seulement, par des substitutions dans une autre couche du feuillet (remplacement de O^{2-} par OH^{-}), soit par des cations adsorbés entre les feuillets.

2. — *Autres hypothèses concernant la structure de la montmorillonite*

Les conceptions de HOFMANN, MARSHALL et HENDRICKS ne rendent pas complètement compte de toutes les propriétés du minéral. EDELMAN et FAVEJEE (réf. cit. in GRIM 1953 *a*) ont suggéré une autre structure qui explique plus parfaitement ces propriétés. Cette structure diffère de la précédente par le fait que les tétraèdres de silicium sont en partie inversés dans les deux couches tétraédriques, de sorte que leurs sommets soient orientés dans la direction opposée. Il y aurait ainsi la moitié des tétraèdres inversés dont le sommet, réorienté, serait d'ailleurs occupé par un hydroxyle (OH) au lieu d'un atome d'oxygène.

Dans cette hypothèse, des substitutions à l'intérieur du réseau ne sont pas nécessaires pour rendre compte de la présence de cations entre les feuillets. Cependant, l'analyse chimique montre l'existence de telles substitutions. D'autre part, les résultats de la diffraction des rayons X et de la déshydratation vont contre cette hypothèse. Étant donné que certaines réactions (réaction de méthylation par exemple) tendraient à prouver l'existence de cette structure, que les données des rayons X ne sont pas encore complètes, il est délicat d'écarter définitivement ce point de vue. Quoi qu'il en soit, notons que l'avis général tend à infirmer cette idée.

D'autres modifications de la structure ont été proposées. Selon McCONNEL (1950), quelques tétraèdres de silicium pourraient être remplacés par des groupements $(OH)_4$, FLINT, MAC MURDIE, et PABST ayant constaté que ce groupe avait la configuration stable d'un tétraèdre, dont les quatre atomes d'hydrogène deviendraient électrostatiquement équivalents à Si^{4+}. Cette hypothèse, qui accepte l'unité de base à trois couches de HOFMANN, se caractérise essentiellement par des modifications de la couche hexagonale des groupes Si_2O_5 qui contient occasionnellement des atomes d'aluminium substitués au silicium. Les radicaux (OH) pourraient se trouver :

— soit en remplacement de Si_2O_5 :

$$n[Si_4O_{10}]^{4-} \rightarrow (n - 1)\,[Si_4O_{10}]^{4-} + [Si_3O_6\,(OH)_4]^{4-}$$

— soit en association avec Al :

$$n[Si_4O_{10}]^{4-} \rightarrow (n - 1)\,[Si_4O_{10}]^{4-} + [Al_3O_6\,(OH)_4]^{7-}$$

D'après GRIM (1953 *a*) ce point de vue serait en accord avec les données de la déshydratation du minéral. Cependant, d'autres études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

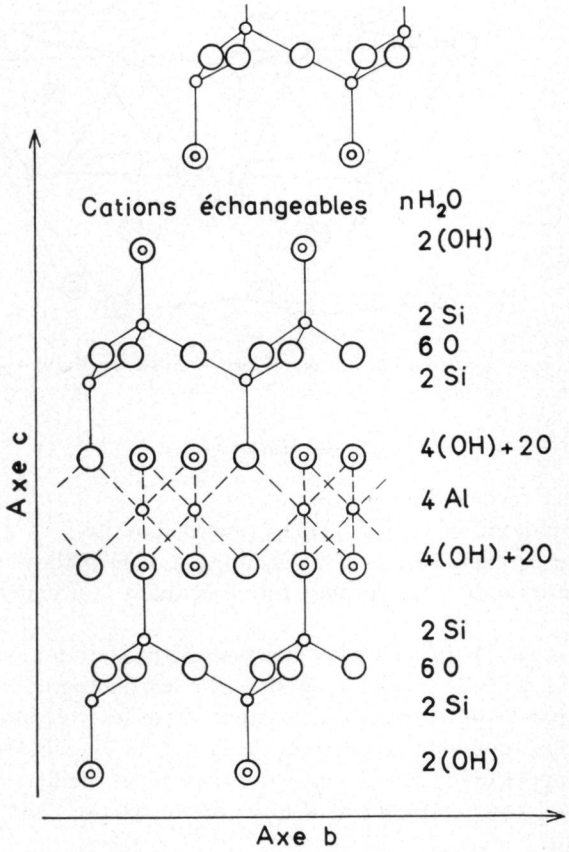


FIG. 2. — *Structure de la montmorillonite d'après* EDELMAN, FAVEJEE (*in* GRIM, 1953 *a*)

B. — LES AUTRES ARGILES

1. — *La kaolinite*

Sa structure a été étudiée par GRUNER (réf. cit. in GRIM 1953 *a*) puis revue par BRINDLEY. Elle est plus simple que celle de la montmorillonite.

Le feuillet élémentaire est constitué par une couche tétraédrique (Si) et une couche octaédrique (Al). Comme pour la montmorillonite, les (OH) sont directement placés en dessous des perforations hexagonales du réseau d'oxygène de la couche tétraédrique.

L'épaisseur du feuillet est de 7,13 Å et la formule est :

$$(OH)_8Si_4Al_4O_{10}.$$

D'autres part, il y a peu de substitutions dans le réseau.

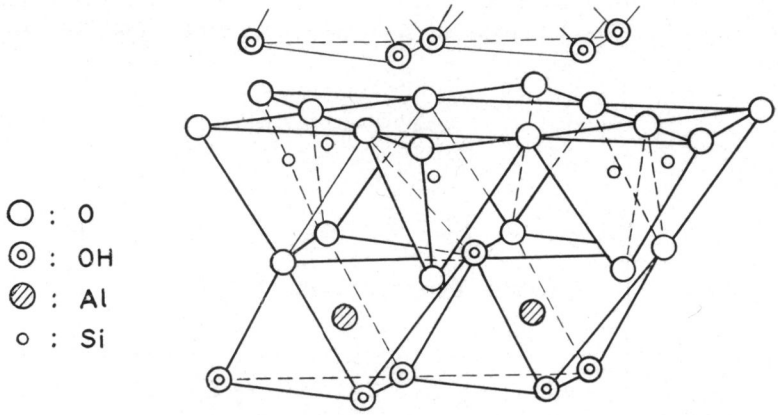


FIG. 3. — *Structure de la kaolinite d'après* GRUNER (*in* GRIM, 1953 *a*)

2. — *Halloysite*

Il existe deux formes d'halloysite :

— une de composition $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ (métahalloysite),

— une autre de composition $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ 4 H_2O (halloysite).

La déshydratation de cette dernière forme donnant la première se fait de façon irréversible.

Pour BATES (1950), la forme hydratée est constituée par des feuillets de kaolinite enroulés en forme de tube. Ceci est appuyé par les photographies au microscope électronique, et par les différences qui existent entre les valeurs des dimensions *a* et *b* dans les plans supérieur et inférieur de la couche de silicate. Cette courbure pourrait se développer grâce à la présence d'eau entre les feuillets qui crée de faibles liens entre ceux-ci, comparativement à la kaolinite. Dans la métahalloysite, cette courbure disparaît.

3. — *La vermiculite*

La structure a été étudiée par GRUNER, puis confirmée par HENDRICKS et JEFFERSON.

Elle est constituée par des couches trioctaédriques de mica ou de talc séparées par une double couche d'eau, occupant un espace défini (4,98 Å).

Elle est déséquilibrée par des substitutions de Al^{3+} à Si^{4+}. La charge réticulaire est élevée ; elle est de 1,4 (—) par unité cellulaire.

II — Propriétés de surface

Les différents types de structure qui viennent d'être décrits, se traduisent par un certain nombre de propriétés. Celles-ci sont très importantes, mais elles se définissent mal, et l'accord des auteurs n'est pas toujours réalisé à leur sujet.

A. — Échange d'ions

Les argiles ont la propriété d'adsorber des cations, qu'ils soient minéraux ou organiques. De même, elles peuvent aussi fixer des anions, mais le phénomène a été moins étudié.

Ces propriétés sont à l'origine de la capacité d'échange de cations (BEC) et de la capacité d'échange d'anions (AEC). Elles peuvent se définir, l'une et l'autre, par la quantité d'ions fixés, exprimée en milliéquivalents, rapportée à un certain poids de minéral.

Exemples de capacités d'échange de cations d'après Grim (1953 *a*) :

Montmorillonite	:	80-150 meq/100 g
Kaolinite	:	3-15 meq/100 g
Halloysite 2 H_2O	:	5-10 meq/100 g
Halloysite 4 H_2O	:	40-50 meq/100 g
Vermiculite	:	100-150 meq/100 g.

La BEC varie donc beaucoup suivant la nature de l'argile. Elle varie aussi en fonction de nombreux autres facteurs (concentration en argile, en cation, pH...).

Certains auteurs, comme Mitra (1952), ont étudié en détail la signification des courbes de titration, ainsi que les causes de l'échange d'ions.

1. — *Les causes de l'échange d'ions*

L'échange de cations peut être attribué à trois causes :

— Les liaisons rompues sur les bords du réseau : elles se traduisent par l'existence de charges non équilibrées. Cette cause intervient dans une proportion relativement faible pour la montmorillonite : environ 20 p. 100 d'après Grim (1953 *a*).

— Les substitutions à l'intérieur du réseau : nous avons vu quelle était leur nature, et quelles étaient leurs conséquences. Cette cause représente environ 80 p. 100.

— Les atomes d'hydrogène des groupements (OH) extérieurs : ils pourraient être remplacés par des cations qui seraient échangeables. Les (OH) seraient exposés par suite de la rupture des bords du feuillet. Cette cause serait assez importante pour la kaolinite et l'halloysite.

De plus, nous avons signalé l'hypothèse de McConnel, selon laquelle il y aurait des (OH) sur les plans de clivage de la montmorillonite. A partir de cette conception, on peut attribuer la totalité de la BEC à cette dernière cause.

L'échange d'anions, qui fut observé pour la première fois par Mattson, Ravikovitch et Scarseth, peut, lui aussi, être attribué à trois causes d'après Grim (1953 *a*).

— Le remplacement des radicaux (OH) : ceci a été suggéré pour l'adsorption des phosphates par Buswell et Dudenbostel.

— Les anions, tels que PO_4^{3-} AsO_4^{3-} qui ont à peu près les mêmes dimensions et la même configuration tétraédrique que les tétraèdres Si, pourraient s'intégrer au réseau sur les bords de la couche tétraédrique (Hendricks).

D'après Schofield, les argiles posséderaient des sites d'échange d'anions.

Notons enfin que des auteurs comme BLANCHET (1960) attribuent un rôle prépondérant aux hydroxydes métalliques colloïdaux dans l'adsorption des anions phosphates.

Les charges négatives portées par les feuillets sont neutralisées par les ions échangeables qui se trouvent ainsi entre ceux-ci.

2. — *Répartition et neutralisation des charges négatives*

Il est intéressant d'introduire ici certaines notions, car elles entraînent des conséquences dans la formation des complexes organiques.

Les particules argileuses sont donc chargées en grande partie négativement. Si on admet une répartition uniforme de ces charges, on est conduit à la notion de densité de charge par unité de surface. Ces densités sont évaluées par les données de l'adsorption négative et de la capacité d'échange de bases (LAUDELOUT 1957, CHAUSSIDON 1961). Cette répartition des charges nous amène à parler de leur neutralisation.

MERING et GLAESER (1953) établissent une distinction entre la neutralisation globale des charges négatives de la montmorillonite par l'ensemble des cations se trouvant entre les feuillets, et leur neutralisation locale. Celle-ci se définit par la réalisation de volumes électriquement neutres aussi petits que possible. (Règle de Pauling.) Les charges négatives étant toujours monovalentes, les possibilités de neutralisation locale diminuent quand la valence du cation augmente. Quand il s'agit de cations monovalents comme le sodium, ceux-ci se placent dans les cavités hexagonales se trouvant au voisinage immédiat d'une charge négative. Quand des cations bivalents comme Ca^{2+} remplacent deux Na^{+} il apparaît un excès de charges positives près des cations, et un excès de charges négatives près des cavités laissées vacantes. Il en résulte que :

— le niveau d'énergie de la montmorillonite augmente ;

— le travail nécessaire pour écarter les feuillets est moindre.

Les cations polyvalents doivent donc avoir une forte tendance à fuir les positions localisées, et à s'incorporer à la couche de solvatation.

La solvatation de l'argile est donc favorisée dans la mesure où la répartition des charges positives dues aux cations, s'écarte de la règle de Pauling.

B. — HYDROXYLES SUPERFICIELS ET ACIDITÉ DE SURFACE

L'étude des propriétés chimiques des hydroxyles est intéressante, car ils interviendraient dans la formation de complexes organiques (DEUEL, FRIPIAT). Les travaux relatifs à cette question sont fort peu nombreux, et se rapportent tous à la kaolinite.

1. — *L'aluminium superficiel*

Ainsi que le note GASTUCHE (1957) l'acidité et les propriétés d'échange ionique des alumino-silicates semblent être liées au comportement de l'aluminium superficiel. MILLIKEN, MILLS et TAMELE ont établi qu'un gel mixte d'aluminium et de silice

comportait autant de sites acides qu'il contenait d'aluminium. Ce fait pourrait s'étendre à la kaolinite.

Deux hypothèses sont avancées :

— D'après TAMELE l'aluminium se trouverait à l'état de coordinance 4. Il formerait un acide de Lewis susceptible de se combiner avec H_2O (base de Lewis) dont le proton deviendrait échangeable (fig. 4).

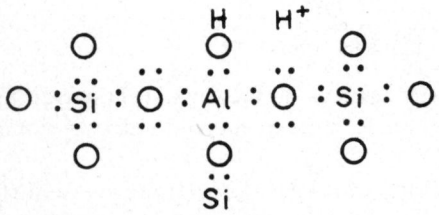


FIG. 4. — *Fixation de* H_2O *par l'aluminium*

— MILLIKEN, MILLS et OBLAD supposent que l'aluminium peut osciller suivant le pH, entre la coordinence octaédrique dépourvue d'acidité (à pH < 4) et la structure tétraédrique (à pH > 4). L'activité de la structure tétraédrique peut être considérée, d'ailleurs, comme venant d'une substitution isomorphique.

Dans une kaolinite, toutes bases de Lewis seraient susceptibles de neutraliser l'acide (structure octaédrique). S'il n'y en a pas, ce sont les hydroxyles du réseau qui se combinent, donnant la structure tétraédrique. Celle-ci n'est pas stable ; à la longue il y a formation d'une surface aluminique.

Cette mobilité de l'aluminium est à noter. Elle n'est pas particulière à la kaolinite. Dans le dosage de l'acidité de surface de la montmorillonite acide, FRIPIAT (1960 *a*) indique qu'une telle argile est en fait partiellement protonique (85 p. 100) et partiellement aluminique (15 p. 100). Ces proportions se modifient dans le temps et la quantité d'aluminium saturant l'argile augmente.

2. — *Les groupes hydroxyles superficiels*

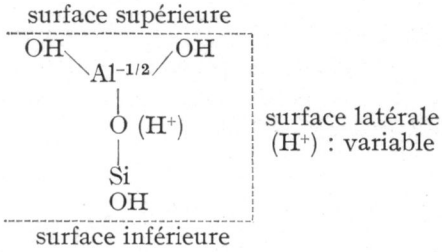
D'après FRIPIAT (1957), il est possible de déterminer tous les (OH) superficiels, ainsi que ceux pouvant réagir (OH acidoïdes). Les premiers le sont par échange isotopique (avec OD_2) ou par la réaction de Grignard.

$$]\text{—OH} + \text{Mg}\begin{matrix}\diagup \text{CH}_3 \\ \diagdown \text{I}\end{matrix} \rightarrow]\text{—O—MgI} + \overset{\nearrow}{\text{CH}_4} \quad \text{on mesura le dégagement gazeux,}$$

Les seconds le sont par méthylation avec le diazométhane.

Les résultats des mesures montrent qu'il y a une étroite correspondance entre le nombre de (OH) acidoïdes et la BEC, ceci, que l'argile soit saturée ou non par un cation. Il en résulte que les (OH) qui subissent la méthylation ne sont pas ceux dont le proton aurait été échangeable par un cation. Les radicaux acidoïdes (OH) seraient liés au silicium.

Selon le même auteur, la kaolinite comprendrait des chaînons actifs du type :



Ces chaînons seraient agencés de façon qu'à chaque groupe Si—OH corresponde une charge négative ; d'où la correspondance entre le nombre de (OH) acidoïdes et la BEC.

En conséquence, il apparaît que la réactivité de la surface de la kaolinite est localisée :

— sur les atomes d'aluminium pour les sites acides ;

— sur les atomes de silicium pour les sites réactifs acidoïdes.

Notons enfin que certains auteurs comme FORD, LOOMIS et FIDIAM (1940) attribuent des propriétés amphotériques aux particules argileuses.

III — L'eau dans les argiles

A. — LA MONTMORILLONITE

La montmorillonite présente un certain nombre de propriétés dues à sa structure. L'eau et les autres molécules polaires, telles que certaines molécules organiques, peuvent pénétrer entre les feuillets et les écarter. Il en résulte que la distance basale (*d*) n'est pas fixe. Elle varie de 9,6 Å quand les feuillets se touchent, jusqu'à séparation complète (NORRISH).

La quantité d'eau retenue entre les feuillets varie suivant les cations saturant l'argile. Selon BARSHAD (1950).

Cations	nombre de couches d'eau
Mg, Ca, Ba	4
H, Li, Na	
K, NH_4, Rb, Cs.....	1

Le rôle des cations s'expliquerait par l'effet contraire qu'ils exercent sur les forces qui maintiennent les feuillets.

La charge réticulaire intervient également ; la montmorillonite Ca (charge : 0,3 à 0,6 (—)/unité cellulaire) gonfle plus que la vermiculite Ca (charge : 0,7 à 1 (—)/unité cellulaire).

Les molécules d'eau pourraient affecter certaine configuration. MERING trouve que la montmorillonite — Ca donne une distance *d* de 14 Å qui correspond, selon lui, à des groupes octaédriques de composition Ca $(OH_2)_6$.

L'eau contenue entre les feuillets peut être éliminée par chauffage. Toutefois

cette élimination n'est pas complète. FRIPIAT, CHAUSSIDON et TOUILLAUX (1960) ont montré qu'au-dessus de 300°C il restait encore de l'eau d'hydratation et que la température de chauffage augmentant, les (OH) du réseau commençaient à être déplacés avant le départ complet de cette eau.

B. — LA VERMICULITE

Des molécules d'eau, et des molécules organiques peuvent aussi pénétrer entre les feuillets de cette argile.

Nous avons vu que l'écartement des feuillets n'excédait pas 4,98 Å, écartement qui correspondait à 2 couches monomoléculaires d'eau. Plusieurs hypothèses ont été avancées quant à la structure de ces couches d'eau.

GRUNER pense que l'eau doit se trouver sous forme d'ion $(OH_3)^+$, alors qu'HENDRICKS et JEFFERSON suggèrent qu'elle doit adopter la configuration d'un réseau hexagonal (les molécules étant liées par des liaisons hydrogène).

Cependant, comme pour la montmorillonite, BARSHAD (1950) et WALKER ont noté que la nature du cation échangeable influençait l'état de l'eau intercalaire :

Cations	nombre de couches d'eau
Ca, Mg, Ba, H	2
Li, Na	
K, NH_4, Rb, Cs.....	rien

D'après WALKER (réf. cit. dans GRIM, 1953 *a*) l'eau existe sous deux formes :

— une eau liée autour des atomes de magnésium, qui prennent probablement la structure octaédrique (l'espace de 4,98 Å est compatible avec ce groupement) ;

— l'eau non liée, qui remplit les espaces entre les unités octaédriques d'eau.

Il importe, enfin, de souligner que l'existence de l'eau entre les feuillets d'une argile lui confère des propriétés colloïdales particulières. Nous verrons que les molécules organiques se comportent souvent d'une façon identique.

CHAPITRE II

MÉTHODES D'ÉTUDE

Outre les méthodes d'analyse chimique, dont nous ne parlerons pas, deux méthodes d'études physiques permettent d'obtenir de précieux renseignements sur la formation et la structure des complexes organiques des argiles. Ce sont :

— la diffraction des rayons X ;

— la spectroscopie infrarouge.

I — La diffraction des rayons X

Elle permit un progrès important depuis 1930, année où PAULING publia une étude sur la structure des micas et des chlorites. Depuis, de nombreux auteurs ont utilisé cette technique pour déterminer, dans ces études de complexes :

— l'épaisseur et l'écartement des feuillets argileux ;

— les densités électroniques.

A. — ÉPAISSEUR ET ÉCARTEMENT DES FEUILLETS

On sait que les ions d'un cristal forment des plans qui se répètent périodiquement à égale distance. N'importe quelle série de plans a toujours la même orientation par rapport à toute autre série, indépendamment de la partie du cristal choisie.

Selon MILLER, les plans basaux sont désignés par la notation o o l.

La distance d entre deux plans réticulaires identiques varie avec l'espacement interlamellaire. Quand les feuillets sont en contact, elle est égale à leur épaisseur (e). Exemple : pour la montmorillonite $e = 9{,}6$ Å.

Dans l'étude des complexes organiques des argiles, il est intéressant de connaître l'espacement des feuillets, car nous savons que les molécules peuvent s'insérer entre eux. L'application de la loi de BRAGG, ou condition de réflexion de BRAGG ($n\lambda = 2\,d \sin\theta$) permet de déterminer la valeur de d o o l, et les réflexions indicées o o l sont dites réflexions basales.

Pour mesurer correctement les valeurs de d o o l, il faut que les feuillets, donc les particules, soient bien orientés. La plupart des argiles, sous forme de poudre tassée, s'orientent assez facilement. Cependant, certains auteurs ont décrit des méthodes particulières pour obtenir une très bonne orientation (BRADLEY, GRIM et CLARK).

Il est parfois difficile de déterminer l'espacement interlamellaire, car le nombre de réflexions o o l observées est limité. Généralement, l'intensité est bonne pour $1 \leqslant l \leqslant 4$, et diminue beaucoup pour les valeurs supérieures (7, 8 au maximum). Ceci est dû aux pertes d'énergie dans le cristal et aux interactions avec les autres réflexions.

Si la valeur de la distance interfeuillet est constante, on constate que les produits des équidistances o o l par les valeurs de l'ordre correspondant sont égaux. Dans ce cas la série de réflexions est dite rationnelle. S'il n'en est pas ainsi, les produits d o o $l_i \times l_i$ ne sont pas égaux entre eux ; la série de réflexions est dite irrationnelle. C'est l'indice d'une interstratification caractérisée par plusieurs valeurs de d o o l.

B. — Les densités électroniques

Selon Bragg, on peut considérer la structure d'un cristal comme une répartition périodique suivant trois directions, de la densité électronique. Étant donné que ce sont les électrons qui diffractent les rayons X, l'emploi de ces derniers permet de déterminer les densités électroniques.

Soit $F_{(h,k,l)}$, le facteur de structure, pour tous les atomes d'une maille élémentaire :

$$F_{(h,\,k,\,l)} = \sum_{fn} e^{2\pi i\left(h\frac{x}{a} + k\frac{y}{b} + l\frac{z}{a}\right)}$$

où : h, k, l : Indices de Miller,
x, y, z : Coordonnées des atomes,
a, b, c : Dimensions de la maille élémentaire,
n : Nombre d'atomes dans la maille élémentaire,
f_n : Coefficient de diffusion atomique.

L'intensité du rayonnement diffusé est proportionnelle à $F\,|\,(h, k, l)\,|^2$, $F\,(h, k, l)$ étant aussi l'amplitude résultante des ondes diffusées à partir des plans (h, k, l) de tous les atomes de la maille élémentaire.

On peut alors représenter la densité des électrons par :

$$\rho(x, y, z) = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} A_{pqr} e^{-2\pi i\left(p\frac{x}{a} + q\frac{y}{b} + r\frac{z}{c}\right)}.$$

On montre que les coefficients $Apqr$ de cette série sont égaux aux coefficients de structure divisés par le volume élémentaire. D'où :

$$\rho(x, y, z) = \frac{I}{V} \sum\sum\sum F(h, k, l) e^{-2\pi i\left(h\frac{x}{a} + k\frac{y}{b} + l\frac{z}{c}\right)}.$$

Une fonction de ce genre peut se transformer en une série de Fourier, c'est-à-dire, en une somme de sinus ou de cosinus.

Les positions des divers atomes correspondent à des maxima de la fonction ρ, et les intervalles entre les atomes correspondent aux minima de cette fonction.

Par projection sur un plan de cette fonction, on obtient un diagramme indiquant les positions projetées des atomes dans ce plan. La projection peut également se faire sur un axe. On obtient respectivement, des synthèses bi ou monodimensionnelles de Fourier.

Ces résultats sont extrêmement intéressants. En effet, de telles opérations permettent de déterminer la position relative des atomes d'une molécule qui se trouve, entre les feuillets de l'argile. On peut alors en déduire l'orientation de ces molécules et le nombre de couches qu'elles forment, en prenant comme base leurs « dimensions de Van der WAALS ».

II — La spectroscopie infrarouge

Tout mouvement d'un système atomique, accompagné d'une variation de son moment dipolaire, conduit à une émission ou à une absorption d'énergie. Il conduit donc à une émission ou une absorption de radiations (HERZBERG, 1960).

Durant le mouvement vibratoire d'une molécule, la distribution des charges subit une variation périodique, qui se traduit généralement, mais pas toujours, par une variation du moment dipolaire. Dans l'approximation de l'oscillateur harmonique, tout mouvement vibratoire de la molécule peut être résolu en une somme de vibrations normales avec des amplitudes appropriées. D'autre part, puisque les vibrations normales sont seulement de simples mouvements périodiques, les fréquences normales sont les fréquences émises ou absorbées par la molécule. Elles se situent approximativement entre 500 et 4 000 cm^{-1}.

On peut classer les vibrations en deux grands groupes :

— les vibrations de valence qui se font suivant la direction des liaisons ;

— les vibrations de déformation de la molécule qui peuvent affecter des modalités très variées.

Un fait est important : seules les vibrations qui provoquent une variation du moment dipolaire sont actives dans l'infrarouge.

Si une radiation électromagnétique de fréquence ν, rencontre un vibrateur harmonique de fréquence ν, celui-ci absorbe la radiation (dans la mesure où la vibration conduit à une absorption d'énergie). Pour que cette absorption soit complète, il faut que les directions des vecteurs électrique et magnétique soient perpendiculaires à la direction de la vibration, ce qui implique une orientation particulière de la molécule.

En conséquence, il sera possible de déterminer les fréquences des vibrations absorbées d'une molécule, si on connaît les fréquences des radiations électromagétiques.

Cette technique permet de compléter l'étude des complexes organiques des argiles. En effet, il devient possible de trouver quelle est la nature des molécules se trouvant entre les feuillets, et parfois de mettre en évidence certaines transformations non décelables par voie chimique. Évidemment, cela n'est possible que dans la mesure où l'on peut exploiter des vibrations actives dans l'infrarouge.

Elle permet aussi de préciser l'orientation de la molécule ; toutefois, faut-il alors beaucoup de prudence. Enfin, elle renseigne sur la nature des liaisons que peuvent contracter ces molécules, soit entre elles, soit avec le réseau argileux. Nous rencontrerons assez souvent la liaison hydrogène ; celle-ci se manifeste en déplaçant les vibrations de valence vers les basses fréquences, et les vibrations de déformation vers les hautes fréquences (PIMENTEL, 1960).

Cependant, il existe encore une difficulté. En effet, le réseau cristallin de l'argile et l'eau d'hydratation donnent des vibrations actives. Par conséquent, si les vibra-

tions des molécules que l'on étudie se trouvent dans les mêmes zones, l'interprétation des spectres deviendra délicate.

Les principales vibrations de la montmorillonite hydratée sont :

— vibration de valence des (OH) de constitution : 3 636-3 745 cm^{-1} ;

— vibrations du squelette (Si—O—Al ; Si—O—Mg ; Si—O—Si ; Al—O—H) : entre 950 et 1 050 cm^{-1} ;

— vibration de valence de l'eau adsorbée : 3 460 cm^{-1} ;

— vibration de déformation de l'eau adsorbée : 1 600 cm^{-1}.

DEUXIÈME PARTIE

FORMATION DES COMPLEXES ORGANIQUES DES ARGILES

Nous savons que l'existence des interactions entre les substances organiques et les argiles a été constatée par de nombreux auteurs.

SMITH (1934) montra que les réactions entre la montmorillonite et les bases organiques étaient des réactions d'échanges d'ions. Ce point fut confirmé par d'autres auteurs (GIESEKING, JENNY, HENDRICKS...). Outre ces phénomènes, fut mise en évidence aussi, la fixation sur les argiles d'alcools, d'esters, de cétones. Parallèlement, des expériences ont montré que les argiles pouvaient entrer en réaction avec certaines substances (DEUEL, FRIPIAT).

Le nombre de complexes susceptibles d'être formés est très grand. Ils peuvent cependant, se répartir en trois catégories :

— Les complexes formés à partir des molécules ionisées.

— Les complexes formés à partir des molécules non ionisées.

— Les complexes formés au cours d'une réaction chimique.

Nous étudierons successivement chacune de ces catégories. Notons toutefois, que nous parlerons surtout de la montmorillonite, peu d'études ayant été faites sur les autres argiles.

CHAPITRE I

COMPLEXES FORMÉS A PARTIR DES MOLÉCULES IONISÉES

Nous savons que les argiles chargées négativement, fixent les cations minéraux. Suivant un processus analogue, elles peuvent aussi fixer des cations organiques. Pour que cette fixation ait lieu, il faut que, dans la molécule, apparaisse un radical cationique. Autrement dit, la molécule pour être adsorbée, doit présenter des caractères basiques. Ainsi, plus ce caractère sera accentué, plus l'adsorption sera effective.

Signalons tout de suite que beaucoup de cations organiques contiennent des groupements aminés, et que ce sont eux les plus étudiés.

D'une façon générale, ces cations sont des ions NH_4^+ dans lesquels, un ou plusieurs atomes d'hydrogène ont été remplacés par un radical organique. Qualitativement, la force basique d'une amine est reliée à la possibilité de fixer facilement un proton. Celle-ci dépend de deux choses (VENE, 1957) :

— de la charge portée par l'azote, charge due aux effets électroniques inductifs des substituants de l'azote ;

— des possibilités de conjugaison du doublet électronique libre de l'azote, avec les électrons mobiles des substituants.

On peut donc s'attendre à des modifications du comportement des amines selon la nature des substituants. Cette notion nous amène à distinguer deux cas :

— 1er *cas* : la fonction amine est seule,

— 2e *cas* : la fonction amine et d'autres fonctions sont présentes.

Enfin, il est certain cas où la fixation des substances organiques sur la surface de l'argile s'acccompagne de leur transformation. Il arrive aussi que l'adsorption se fasse par un autre mécanisme que l'échange ionique. Cependant, ce dernier existe toujours dans tous les cas. Nous envisagerons donc deux groupes de phénomènes :

— Ceux où l'échange ionique est seul ou largement dominant.

— Ceux où l'échange ionique s'accompagne de transformations secondaires, et est suivi par un autre type d'adsorption.

Cet autre type d'adsorption, que nous appelons « adsorption physique » ne sera d'ailleurs étudié qu'au chapitre suivant.

I — L'échange ionique est seul ou dominant (fixation égale ou supérieure à la B. E. C.)

A. — MOLÉCULES OÙ LA FONCTION AMINE EST SEULE

GIESKING et JENNY (1939) ont montré que les ions NH_3R^+, NH_2R^+, NHR_3^+ et NR_4^+, prenaient part au phénomène d'échange. Nous n'étudierons pas ici les amines qui se fixent sous forme de molécules neutres, pas plus que celles qui donnent lieu à des réactions secondaires.

1. — *Mécanisme de la fixation*

a) *Réactions.*

Il faut distinguer deux cas : celui des montmorillonites acides, et celui des montmorillonites saturées.

Montmorillonites acides. — En fait, comme nous le savons, il s'agit essentiellement d'argiles mixtes aluminiques et protoniques.

En milieu aqueux se produit l'équilibre entre l'amine et l'ion hydronium :

$$A + (H_3O)^+ + \rightarrow AH^+ + H_2O$$

A : amine

AH^+ : ion alkylammonium.

D'après MAVEL (réf. cit. in SERVAIS, 1960) l'équilibre est déplacé vers la droite si $pKb < 8$. Dès lors il est probable que des amines telles que la butylamine, la propylamine, l'éthylènediamine, la propylènediamine, se transforment en ions alkylammonium au contact de la surface acide, suivant les réactions (SERVAIS, 1960) :

$$\text{Mont}^{te}\ H^+ + A \rightarrow \text{Mont}^{te}\ AH^+$$

$$\text{Mont}^{te}\ Al\ (H_2O)_6^{3+} + A \rightarrow \text{Mont}^{te}\ AH^+ + Al\ (H_2O)_6\ OH^{2+}.$$

La deuxième réaction indique la libération d'aluminium. Ceci est important, car c'est un moyen de vérifier la façon dont les polyamines sont fixées, c'est-à-dire de savoir si une ou plusieurs fonctions amines interviennent. SERVAIS a montré que le déplacement de l'aluminium était indépendant de l'espèce moléculaire. Par conséquent, les diamines, par exemple, se fixent comme des bases bifonctionnelles. Cependant, ce résultat n'est pas général. D'autres auteurs (GLAESER, 1954) signalent que les diamines peuvent se fixer par une ou deux fonctions.

Montmorillonites saturées. — La réaction globale peut s'écrire :

$$\text{Mont}^{te}\ M^+ + RNH_3^+ \rightarrow \text{Mont}^{te}\ RNH^+ + M^+.$$

La fixation des amines se traduit par une libération de cations (HAXAIRE, 1956 ; MOREL, 1957, 1958). Exemples : fixation de la monométhylamine et de l'heptylamine par la montmorillonite Na.

TABLEAU I

Monométhylamine (HAXAIRE)

Essais	1	2	3	4	5	6
Quantités d'amine offertes	10,3	25,9	51,8	93,0	598,0	2 074,0
Quantités d'ions Na déplacés	11,5	25,0	47,0	82,0	92,8	94,0
	10,0	31,7	52,6	78,5	90,7	92,7

TABLEAU 2

Heptylamine (HAXAIRE)

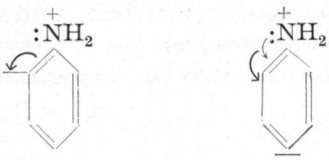
Essais	1	2	3	4	5
Quantités d'amine offertes	15,0	28,0	50,0	93,0	2 000
Quantités d'ions Na déplacés	13,0	27,2	49,0	80,0	92,8
	19,7	29,0	51,0	—	93,0

(Les résultats sont exprimés en meq pour 100 g d'argile.)

Ce mécanisme est aussi bien applicable aux corps azotés aliphatiques qu'aux corps azotés cycliques.

Cependant, il faut noter que des substances telles que l'aniline et ses dérivés (N monométhylaniline, N diméthylaniline), se fixent par échange d'ions et que leur fixation s'accompagne de la libération d'une quantité équivalente de cations minéraux (HAXAIRE). D'autres molécules, comme la pyridine, la diphénylamine, l'α-naphtylamine, se fixent en quantités moindres, tout au moins par échange de bases. D'autre part, HAXAIRE remarque qu'il faut toujours de plus grandes quantités de bases qu'avec les amines aliphatiques. Ceci est dû évidemment à la force basique plus faible des arylamines. En effet, la résonance entre le groupement fonctionnel et le noyau amène une diminution de la disponibilité du doublet électronique libre de l'azote pour capter un proton (VENE, 1957).

Ce fait s'explique par les déplacements mésomères :



Enfin, des amines cycliques comme l'α-naphtylamine se fixent aussi par adsorption physique.

Nous venons de décrire les mécanismes d'une façon globale et toutes les réactions écrites montrent l'amine sous forme ionique. Il faut donc avoir la preuve de cette ionisation, et ensuite savoir comment elle a lieu.

b) *Spectroscopie infrarouge.*

Il ne s'agit pas d'étudier ici tous les renseignements que peut nous donner cette technique. Nous ne nous intéresserons qu'à la mise en évidence de l'association de NH_2 avec le proton.

SERVAIS (1960) prend comme standard les spectres obtenus à partir des amines et des chlorhydrates correspondants. Quant au choix des domaines de fréquences, il est limité par les vibrations du réseau argileux. Nous savons, en effet, que la présence des (OH) dans celui-ci, ainsi que l'eau d'hydratation rendent difficiles les

observations dans la région des vibrations de valence, (de 3 000 à 3 600 cm^{-1}), région où se trouve celle de N—H. De plus, le domaine spectral entre 800 et 1 250 cm^{-1} est occupé par les vibrations de Si—O. Il ne reste donc que la région où se trouvent les vibrations de déformation des radicaux organiques.

Les fréquences observées à partir des amines et de leurs chlorhydrates dans la région de 1 250 à 1 600 cm^{-1} sont les suivantes (SERVAIS):

	NH_2 angulaire	NH_3^+ asym.	NH_3^+ sym.
Éthylènediamine	1614 (*b*)	—	—
Propylènediamine	1 623	—	—
Butylamine	1 618	—	—
Propylamine	1 629	—	—
Éthylènediamine HCl	—	1 595 (*a*)	1 513 (*a*)
Propylènediamine HCl	—	1 600	1 513
Butylamine HCl	—	1 594 (*c*)	1 505 (*c*)
Propylamine HCl	—	1 613	1 513

a : D. B. POWEL
b : A. SABATINI et S. CALIFANO
c : LARSON.

Remarque : nous n'avons pas rapporté ici les vibrations de déformation des radicaux CH_2 et CH_3.

Avant de parler des résultats, signalons que les spectres sont obtenus à partir de films formés de cristallites de montmorillonite fortement orientés, l'axe *c* étant préférentiellement dans la même direction que le faisceau (fig. 5).

D'après les spectres obtenus, SERVAIS distingue deux types de complexes :

Complexes I	Caractéristiques spectrales
Mont^te HAl + Butylamine Mont^te HAl + Propylamine Mont^te Na + Butylamine Mont^te Na + Propylamine Mont^te Ca + Propylamine Mont^te HAl + Éthylènediamine (50 millimoles)	NH_3^+ symétrique NH_3^+ asymétrique probablement présente, mais noyée dans H_2O

Complexes II	Caractéristiques spectrales
Mont^te HAl + Éthylènediamine (saturée) Mont^te HAl + Propylènediamine (saturée) Mont^te Na + Éthylènediamine Mont^te Na + Propylènediamine	NH_2^+ présente NH_3^+ + symétrique et asymétrique absentes

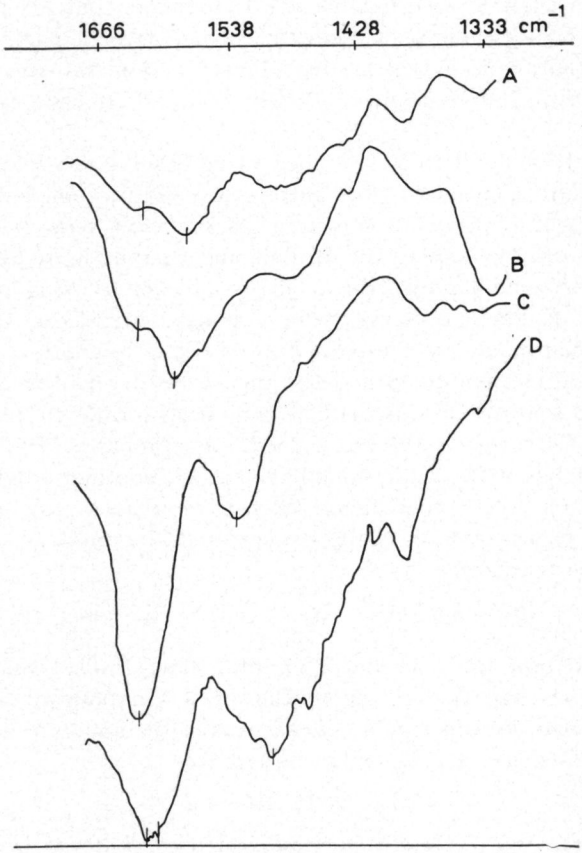


FIG. 5. — *Spectres infrarouge de quelques complexes aminés de la montmorillonite* (SERVAIS, 1960)
A — Montmorillonite Na + P. D. A. (sat.).
B — Montmorillonite H Al + E. D. A. (sat.).
C — Montmorillonite H Al + E. D. A. (50 millimoles).
D — Montmorillonite H Al + B. A. (sat.).

Il apparaît que les diamines, en grandes quantités, s'adsorbent sous forme de molécules neutres. Nous étudierons ces complexes ultérieurement.

Par conséquent, il est évident que l'amine s'ionise quand les conditions le permettent.

c) *Ionisation et fixation.*

Il y a donc fixation d'un proton par l'amine.

EISCHEN et PLISKIN (1954) ont montré que la chemisorption de l'ammoniac par un alumino-silicate catalyseur de cracking, provoquait l'apparition de NH_4^+. De la même façon FRIPIAT et *al.* (1962) ont montré que l'adsorption de NH_3 sur la montmorillonite (protonique ou calcique) entraînait l'apparition des bandes caractéristiques de NH_4^+. La formation de NH_4^+ ne peut évidemment provenir que de l'interaction de NH_3 et d'un proton. Plusieurs théories ont été avancées. Le proton proviendrait, soit de la dissociation des groupes aluminiques acides, soit

des silanols superficiels. Il est probable que la première source soit en fait la plus active (FRIPIAT, VANCOMPERNOLLE, SERVAIS, 1960 *a*). D'autre part, d'après EISCHEN et PLISKIN, la rétention de NH_3 serait due à l'intervention des sites acides de Lewis. Enfin, l'exposition à l'humidité du catalyseur accroît l'intensité de la bande NH_4^+ d'un spectre IR.

Pour la montmorillonite acide, le phénomène observé par EISCHEN et PLISKIN pourrait se produire. Cependant, une autre source de protons doit être envisagée. L'eau adsorbée peut acquérir un caractère suffisamment acide pour libérer un de ses protons, au profit de l'amine. Il faut donc une diminution du pK de dissociation de l'eau, car on sait que l'affinité du radical oxhydrile OH pour le proton est plus grande que celle de RNH_2. Les charges électriques superficielles, les cations minéraux adsorbés, pourraient être responsables de cette diminution.

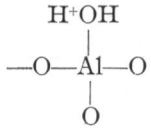
Le cas des montmorillonites saturées est apparemment plus difficile à expliquer. En effet, les spectres sont obtenus à partir de complexes formés en milieu benzénique. Par conséquent, la formation d'ions devient peu probable. Toutefois, rappelons que l'on ne peut pas déshydrater complètement la montmorillonite sans l'altérer. Il faut donc chercher des explications. SERVAIS en avance plusieurs :

— L'action polarisante des charges superficielles permettrait à l'eau résiduelle d'interréagir selon le schéma :

$$(Na^+)\ \text{ads.}\ OH\cdots H\cdots\ (H_2\ N{-}R)\ \text{ads.}$$

Là encore, il faut invoquer une diminution du pK de l'eau. Cependant, les spectres IR relevés par SERVAIS ne révèlent rien qui pourrait appuyer ce fait.

— Existence sur les surfaces latérales d'atomes d'aluminium non échangeables fonctionnant comme des acides de Lewis hydratés :



A ce sujet, signalons que JONHSON (1955) pense que la butylamine réagit avec les molécules d'eau activées fixées sur les atomes d'aluminium.

— L'amine serait adsorbée sous forme d'un complexe de coordination avec les cations présents dans l'espace interlamellaire. C'est d'ailleurs l'hypothèse avancée par MORTLAND pour NH_3 (réf. cit. in SERVAIS, 1960).

Soulignons que la formation de ces complexes en milieu aqueux met probablement en jeu les mêmes phénomènes, à cela près, que les propriétés de l'eau chemisorbée doivent être modifiées par la présence de l'eau d'hydratation.

Aucune de ces hypothèses n'est donc en fait satisfaisante, et de plus, les données expérimentales sont encore insuffisantes pour attribuer une plus grande valeur à l'une ou à l'autre. Cependant, l'hypothèse de la dissociation de l'eau chemisorbée vient de se trouver récemment renforcée par un travail de DUCROS (1962) concernant les spectres de résonance magnétique nucléaire, de différentes argiles hydratées.

Pour nous résumer, nous pouvons dire que la fixation des amines se fait très certainement sous la forme ionique RNH_4^+ quand les conditions de formation des complexes le permettent. Le proton provient, soit des sites acides de Lewis (Al)

soit de la dissociation de l'eau chemisorbée. Quant aux cations minéraux, leur rôle est encore mal défini. Ils doivent conditionner, dans une certaine mesure, l'état de l'eau chemisorbée, et participer aussi à la formation des complexes.

d) *Données thermodynamiques.*

Il existe très peu d'études relatives à l'énergétique de la fixation des molécules organiques sur les argiles.

COWAN et WHITE (1958) supposent l'existence de l'équilibre :

$$NaZ_{(s)} + RNH_3^+ \rightleftharpoons Na^+ + RNH_3Z_{(s)}.$$

En appliquant la loi d'action de masse à cet équilibre, on obtient :

$$K = \frac{(Na^+)\,(RNH_3Z)}{(NaZ)\,(RNH_3^+)} = \frac{(Na^+)\,(N_{RNH_3^+})}{(RNH_3^+)\,(N_{Na^+})} \text{ où}$$

$N_{RNH_3^+}$ et N_{Na^+} sont les quantités d'ions fixés sur l'argile.

Remarquons qu'il n'est pas nécessaire d'introduire les activités, car les concentrations ne sont pas connues avec une très grande précision.

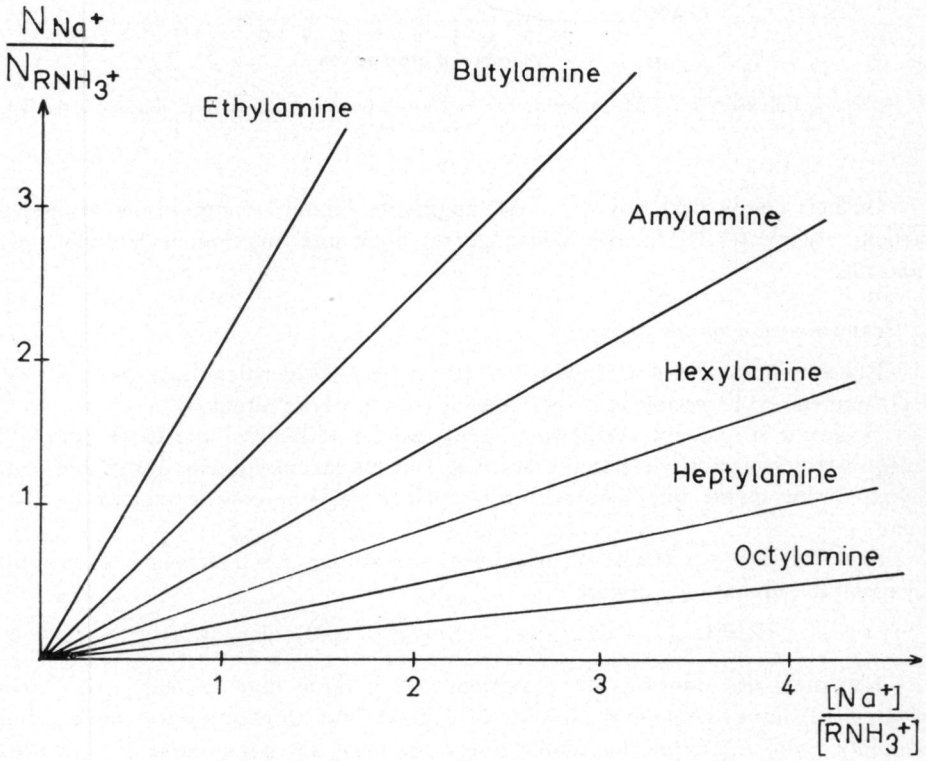


FIG. 6. — *Variations du rapport* $\frac{N_{Na^+}}{N_{RNH_3^+}}$ *en fonction du rapport* $\frac{[Na^+]}{[RNH_3^+]}$ *pour différentes amines* (COWAN, WHITE, 1958)

La connaissance de K permet d'obtenir la variation d'énergie libre :

$$\Delta F = - RT \text{ Log } K.$$

En portant sur un graphique $\frac{(N_{Na+})}{(N_{RNH_3^+})} = f\left(\frac{(Na^+)}{(RNH_3^+)}\right)$ on obtient des droites de coefficient angulaire K (fig. 6).

Le graphique (fig. 7) montre les variations de — ΔF en fonction du nombre d'atomes de carbone de la molécule d'amine.

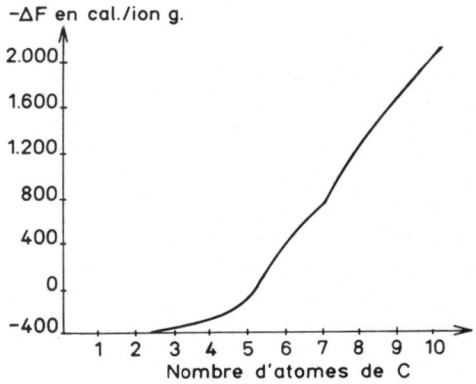


FIG. 7. — *Variations de — ΔF en fonction du nombre d'atomes de carbone de la molécule d'amine* (COWAN, WHITE, 1958)

On voit que la variation de — ΔF augmente quand le nombre des atomes de carbone augmente. La facilité d'échange est donc une fonction de la taille de la molécule.

e) *Désorption des amines fixées.*

Elle est intéressante à étudier, car elle permet de vérifier dans quelle mesure le phénomène est réversible et d'avoir une idée des forces de rétention.

HAXAIRE (1956 *a*) a vérifié que l'heptylamine se fixait d'une façon réversible puisqu'il trouve 93 p. 100 de l'amine désorbée. De plus, les diagrammes de diffraction des rayons X montrent que l'amine est remplacée par une couche monomoléculaire d'eau.

SERVAIS (1960) a étudié la désorption des amines par l'alcoolate de sodium. La réaction suivante se produit :

$$(RNH_3^+)_{ads} + CH_3ONa \rightarrow (Na^+)_{ads} + CH_3OH + RNH_2$$

L'examen des positions des réflexions 00 *l* indique dans ce cas, que l'alcoo produit et l'amine libérée sont expulsés des feuillets. Au fur et à mesure que le sodium remplace l'ion organique, les feuillets se referment. Ils ne s'écartent à nouveau qu'avec un excès d'alcoolate.

Bien que ce ne soit pas le but de ce chapitre, notons déjà la différence de comportement entre l'eau et l'alcool.

Quant aux substances azotées cycliques, leur élution semble difficile. GREENE-KELLY (1955 *b*) observe un phénomène d'hystérésis pour la pyridine (fig. 8).

L'explication du phénomène n'est pas connue, mais les mécanismes d'adsorption et de désorption sont probablement différents. L'absorption se fait peut-être espace interfeuillet par espace interfeuillet, alors que la désorption se ferait par une diminution uniforme de la concentration de surface.

Il en résulte que les molécules de pyridine sont fortement retenues. D'ailleurs HAXAIRE n'observe pas de désorption de cette molécule par action du chlorure de baryum.

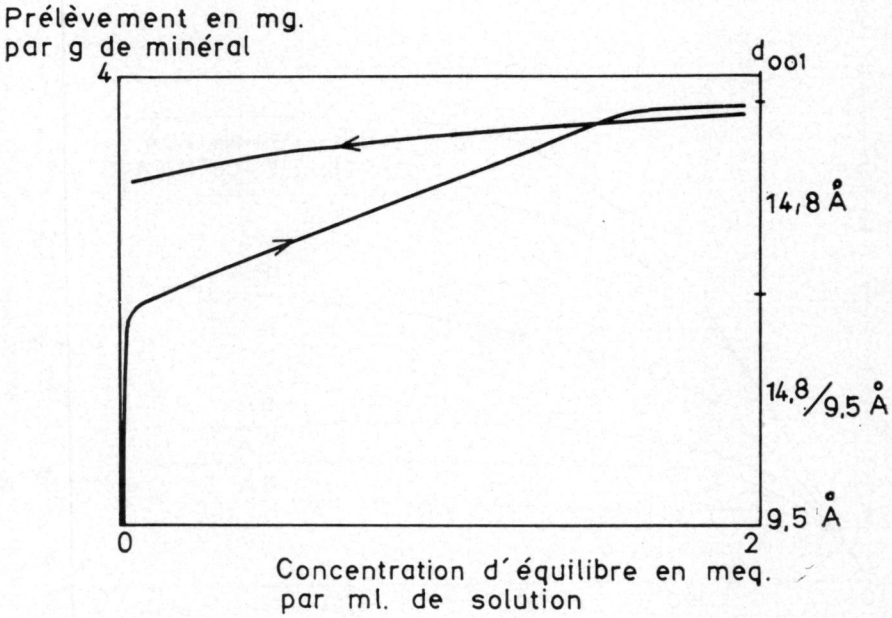


FIG. 8. — *Quantités de pyridine adsorbées et désorbées en fonction de la concentration d'équilibre de la solution de pyridine. Variations de d 0 0 l* (GREENE-KELLY, 1956 *b*)

Enfin, COWAN et WHITE (1958) ont constaté que les amines à haut poids moléculaire étaient plus difficiles à déplacer. Ceci tendrait donc à prouver l'existence d'une rétention assez forte de ces molécules.

2. — *Facteurs influençant la fixation des amines*

Nous avons essayé de dégager les principes de la fixation ainsi que son origine. Tentons de définir, maintenant, les facteurs qui peuvent modifier cette fixation.

a) *L'état de l'argile.*

Il semble évident, à priori, que la formation des complexes soit partiellement sous la dépendance de l'état de saturation de l'argile. En fait, aucune corrélation nette entre celui-ci et la fixation des amines n'a pu être mise en évidence.

b) *Concentration en amine.*

Il est évident que ce facteur intervient. Les tableaux 1 et 2 nous ont déjà montré son influence.

Exemple : (fig. 9).

La capacité d'échange de l'argile étant de 100 meq pour 100 g, on voit que les deux monoamines se fixent sous forme d'ions, et que les diamines se fixent aussi sous cette forme, mais de plus par un autre mécanisme.

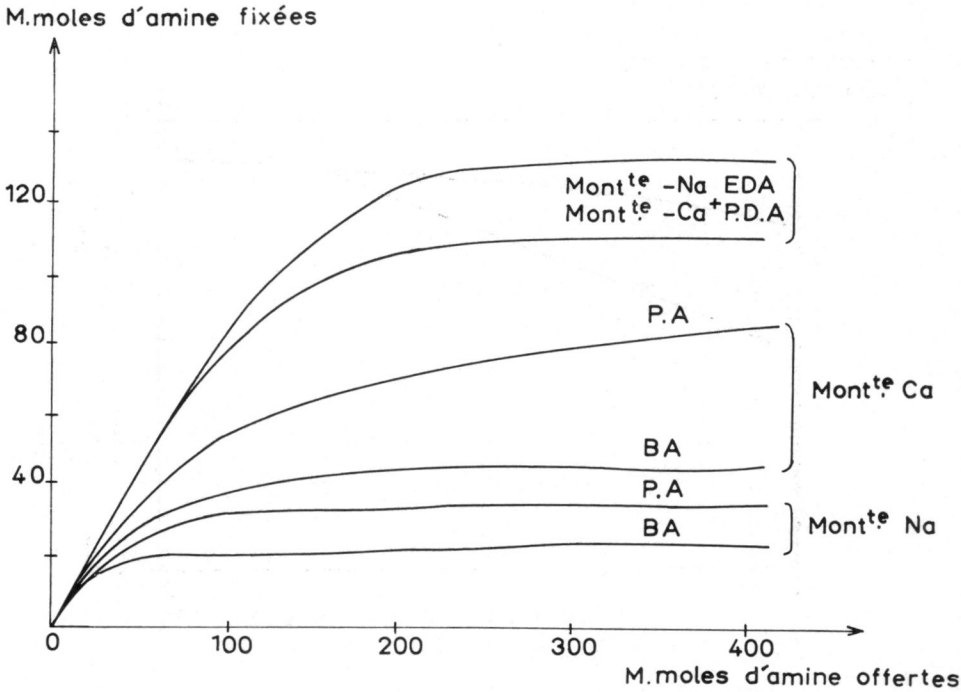


FIG. 9. — *Fixation des amines par les montmorillonites calcique et sodique* (SERVAIS, 1960)

c) *Le pH.*

Ce facteur a été particulièrement étudié par SIESKIND et WEY (1958 *a*, 1958 *b*).

— Des quantités croissantes de butylamine sont ajoutées à une quantité fixe de montmorillonite H à pH 3 et pH 11 (fig. 10).

— Des quantités constantes de butylamine sont ajoutées à une quantité fixe de montmorillonite H à des pH variables (fig. 11).

Le premier graphique montre que la capacité d'échange de l'argile pour le cation est indépendante du pH. La différence aux faibles concentrations peut s'expliquer par l'équilibre :

$$\text{Mont}^{te} - \text{H} + \text{butylamine} \rightleftharpoons \text{Mont}^{te}\ \text{Butylamine} + \text{H}^{+}.$$

Le deuxième graphique indique : 1°) que l'influence du pH ne se manifeste pas de manière continue, et que pour que chaque amine apparaissent deux paliers d'ad-

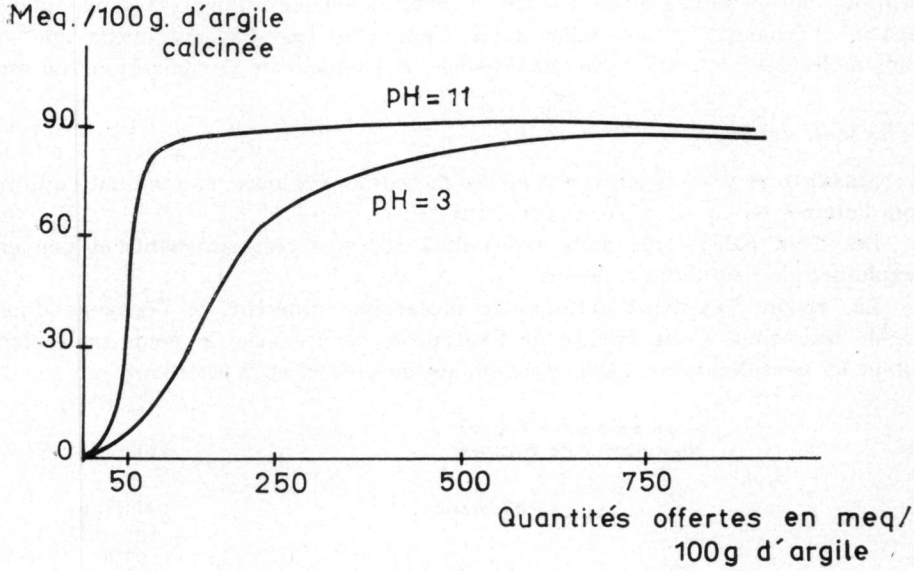


FIG. 10. — *Fixation de la butylamine sur la montmorillonite*-H *à* pH 3 *et* 11 (SIESKIND, WEY, 1958 *a*)

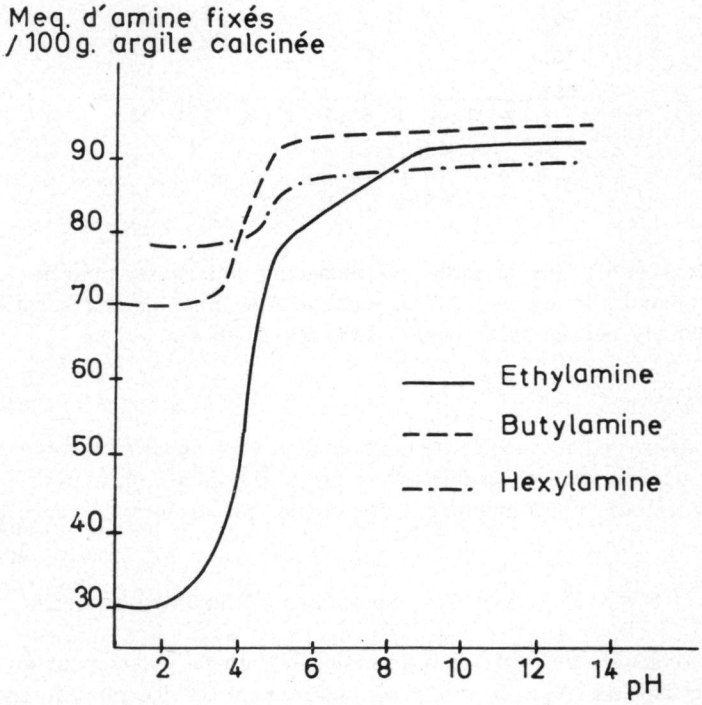


FIG. 11. — *Influence du* pH *sur la fixation des amines* (SIESKIND, WEY, 1958 *b*)

sorption : un en milieu acide, l'autre en milieu alcalin (ce dernier correspondant à la capacité d'échange). 2°) en milieu acide, l'amine se fixe d'autant mieux que son poids moléculaire est élevé. En conséquence, la longueur de la chaîne joue un rôle.

d) *La taille des molécules.*

SIESKIND et WEY (1958 *a*) ont mis ce facteur en évidence, en étudiant l'adsorption d'amines en C_4, C_6, C_8 et C_{10} (fig. 12).

Les deux paliers que nous avons déjà observés réapparaissent, et peuvent s'expliquer par l'équilibre ci-dessus.

Là, encore l'existence d'un autre mécanisme différent de l'échange d'ions semble intervenir. Cette facilité de fixation croissante avec le poids moléculaire rejoint les considérations thermodynamiques de COWAN et WHITE (1958).

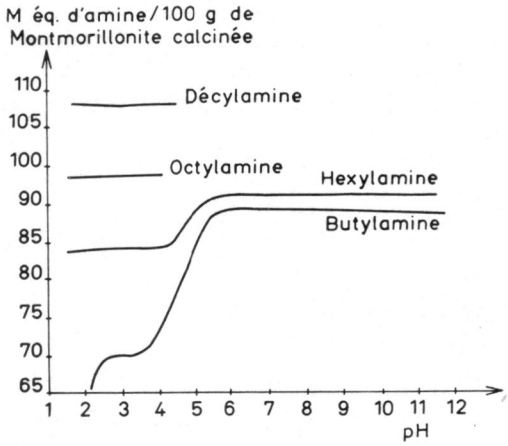


FIG. 12. — *Influence de la taille des molécules et du* pH *sur la fixation des amines* (SIESKIND, WEY, 1958 *a*).

Signalons enfin, que la taille des molécules joue aussi pour les corps azotés cycliques. Quand elle augmente, l'amine tend à se fixer par l'adsorption physique après l'avoir été par échange d'ions (HAXAIRE, 1956 *a*).

Remarque :

Nous avons séparé arbitrairement chacun des facteurs intervenant dans la formation des complexes. En fait, il est impossible de les considérer séparément. Ils interviennent tous simultanément à des degrés qui ne sont pas encore nettement définis.

B. — FIXATION DES MOLÉCULES POLYFONCTIONNELLES

Nous avons étudié la fixation de molécules qui ne possédaient qu'une ou plusieurs fonctions aminées. Envisageons maintenant la fixation de molécules qui possèdent d'autres fonctions. Elles peuvent se diviser en deux catégories :

— les molécules simples ;

— les molécules complexes provenant de l'association d'un plus ou moins grand nombre de molécules simples. Ex. : protéines et nucléoprotéines.

1. — *Les molécules simples*

Nous distinguerons les molécules aliphatiques et les molécules cycliques.

a) *Les molécules aliphatiques.*

Molécules possédant la fonction acide : acides aminés. — Les acides aminés sont des corps amphotères, et leur basicité dépend à un pH donné de la position relative des groupements COOH et NH_2. On peut donc s'attendre à une fixation variable suivant la position des fonctions et le pH du milieu.

SIESKING (1960 *a*) compare la fixation sur la montmorillonite-H des acides aminés suivants (à pH 2).

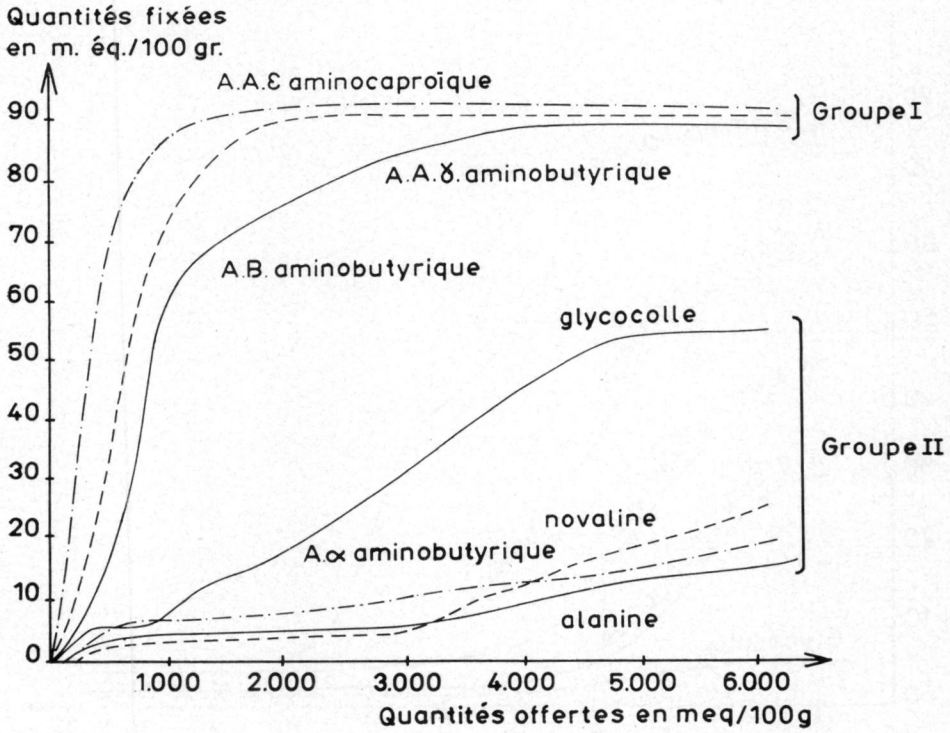


FIG. 13. — *Fixation de différents acides aminés sur la montmorillonite*-H (SIESKIND, 1960 *a*)

Groupe I
- — acide β aminobutyrique : $HOOC—\overset{\overset{NH_2}{|}}{C}H_2—CH—CH_3$
- — acide γ aminobutyrique : $HOOC—CH_2—CH_2—CH_2—NH^2$
- — acide ε aminocaproïque : $HOOC—CH_2—(CH_2)_3—CH_2—NH_2$

Groupe II :
- glycocolle : $CH_2\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases}$
- alanine : $CH_3—CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases}$
- acide α aminobutyrique : $CH_3—CH_2—CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases}$
- novaline : $CH_3—(CH_2)_2CH\begin{cases}NH_2\\COOH\end{cases}$

L'adsorption des acides aminés du groupe I tend vers une limite égale à la capacité d'échange de bases, alors que celle des acides aminés du groupe II n'atteint

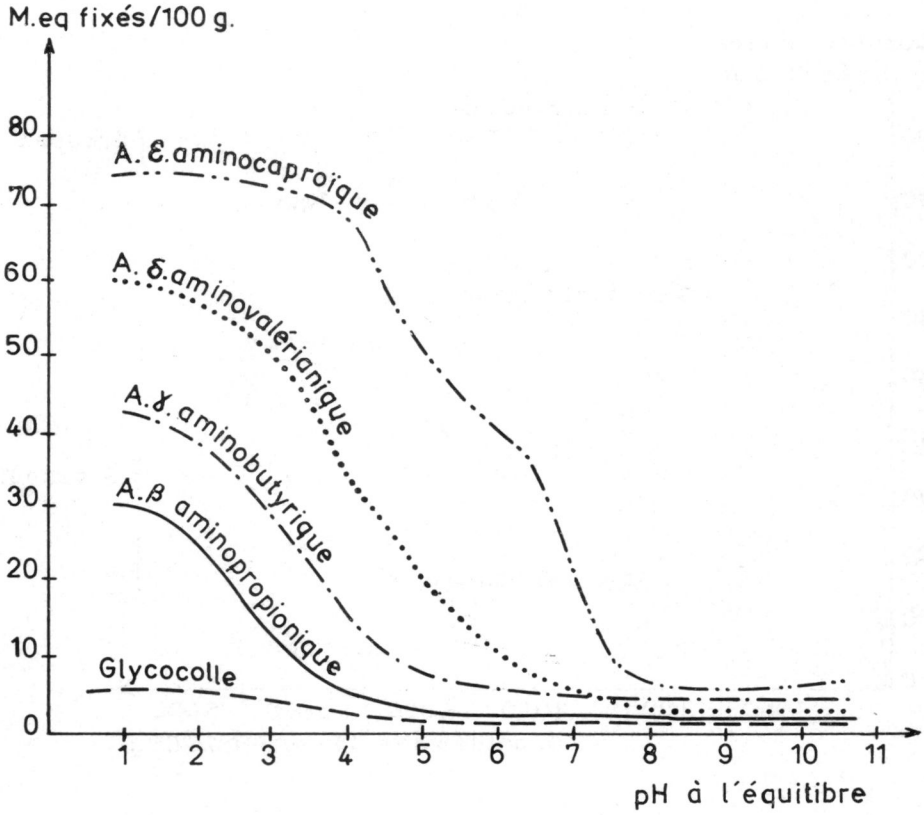


FIG. 14. — *Influence du pH sur la fixation de certains acides aminés* (SIESKIND, 1959)

pas de limite dans le domaine des concentrations étudiées. Ceux de ce dernier groupe ont d'ailleurs des K_b (environ 10^{-12}) supérieurs à ceux du premier (K_b supérieur à $3 . 10^{-14}$).

L'influence de la basicité est encore plus marquée quand le pH varie (SIESKIND, 1959) (fig. 14).

La force basique décroît dans le sens : A. A. caproïque > A. A. valérianique > A. A. butyrique > A. A. propionique > glycocolle. Il en est de même de l'adsorption en pH acide.

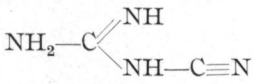
En effet, l'adsorption est maximum à pH 2 car l'aminoacide se trouve entièrement sous forme de cations : ($COOH—R—NH_3^+$). En milieu alcalin, la molécule est chargée négativement et n'est donc plus attirée par les feuillets.

MacLAREN (1954) a également étudié l'influence du pH sur la fixation de certains acides aminés.

La fig. 14 montre aussi que la longueur de la chaîne carbonée intervient.

Un autre point est intéressant à signaler. HAXAIRE (1956 *a*) fait adsorber du glycocolle sur de la montmorillonite-Na au voisinage du point isoélectrique. La fixation de l'acide aminé est inférieure à la capacité d'échange ainsi que le taux de sodium déplacé. Cependant, si l'argile Na séchée est introduite dans la solution de glycocolle, il y a une très importante fixation (265 meq/100 g au lieu de 51). Le fait est peut-être dû à la compétition entre l'acide aminé et l'eau.

Molécules possédant la fonction nitrile. — La dicyanodiamine :



se fixe en faible quantité (environ 20 meq/100 g) et provoque la désorption d'une quantité équivalente de Na^+ (1956 *a*). Cette fixation est assez labile, puisque l'eau permet une élution partielle.

La fonction nitrile diminue donc la basicité de la molécule, comparativement à la guanidine qui est beaucoup plus fixée.

L'adsorption de la créatine et de la créatinine montre un phénomène semblable

Molécules possédant la fonction alcool. — La triéthanolamine $N \equiv (CH_2\ CH_2OH)_3$ se fixe en quantité égale à la capacité d'échange en milieu neutre, avec un taux de sodium déplacé équivalent. L'adsorption a donc lieu par échange ionique. Cependant, la fixation est labile car le lavage à l'eau provoque une désorption partielle.

Notons que, du fait de sa basicité assez faible, la triéthanolamine, employée comme substance tampon, n'entre pas en compétition avec le baryum, dans la méthode de MEHLICH (1942) de détermination de la BEC.

b) *Molécules cycliques.*

L'existence de fonctions électronégatives diminue beaucoup la basicité de NH_2, et il en résulte une très faible fixation :

p-aminophénol : 20,2 meq/100 g Mont^te^ Na ;
p-nitraniline : 5,5
acide *p*- aminobenzoïque : 3,2

Ces résultats s'expliquent par le fait que l'effet inducteur des groupements va dans le sens :

$$OH < NO_2 < COOH$$

2°) *Les molécules complexes*

a) *Les protéines.*

L'interaction entre les argiles et les protéines a été constatée par de nombreux auteurs. MATTSON observa que le point isoélectrique des protéines s'abaissait par addition de bentonite et qu'il se formait un composé non ionisé. MEYER fit de semblables constatations.

ENSMINGER et GIESEKING (1941, 1959) étudièrent la fixation de plusieurs protéines. Celles-ci pénétrent entre les feuillets comme le montrent les valeurs de *d* o o *l* :

Protéines	Quantités fixées g/g d'argile	*d* 0 0 *l* (Å)
Hémoglobine	0,125	13,5
Hémoglobine	0,25	15
Hémoglobine	0,50	23
Hémoglobine	0,75	25
Hémoglobine	1,00	26,9
Hémoglobine	1,25	29,8
Caséine	1,00	41,5
Protamine	1,00	17,5
Pepsine	2,00	17,5
Pancréatine	2,00	17,5

(TALIBUDEEN observe des valeurs différentes, généralement inférieures.)

Le graphique fig. 15 montre l'évolution de l'espace interlamellaire en fonction de la concentration en protéine.

Les protéines se fixent par échange de bases grâce aux groupes aminés libres

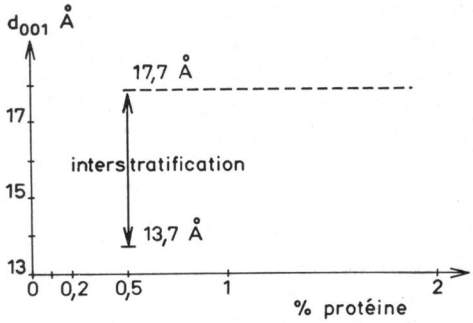
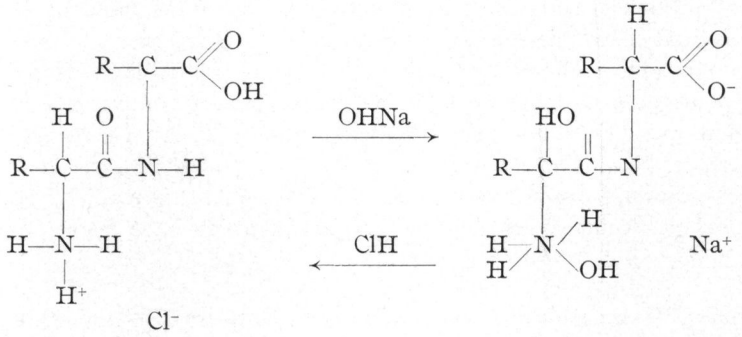


FIG. 15. — *Variation de l'espacement interlamellaire lors de la fixation de la gélatine* (ENSMINGER, GIESEKING, 1941, 1959)

qui leur donnent des propriétés de cations. L'apparition de ces propriétés est sous la dépendance du pH suivant l'équilibre :



La fixation augmente donc quand le pH diminue. Par contre, quand celui-ci augmente, la protéine tend à devenir électronégative et ne s'adsorbe pas ou peu.

MacLaren (1954) observe un maximum d'adsorption au point isoélectrique. Il explique cela par le fait que presque toutes les molécules sont neutres. Il est difficile de concilier cette observation avec ce qui précède.

La destruction des groupes NH_2 par l'acide nitreux, réduit considérablement l'adsorption, d'où la présence de l'activité des groupes cationiques. La fixation résiduelle observée semble être due à une fixation polaire. De plus, on peut penser qu'une protéine sera d'autant plus adsorbée qu'elle possédera moins d'atomes de carbone par groupe cationique (Gieseking, Hendricks, Bradley). Une relation empirique traduisant ce fait, a été suggérée entre la fonction $\frac{Vm.fb}{N^+}$ et les valeurs de *d* o o *l*.

Vm : volume moléculaire.
f_b : fraction de la capacité d'échange saturée.
N^+ : nombre de groupes cationiques par molécule.

Cette relation n'est cependant pas générale.

Les protéines sont assez solidement fixées. Elles ne sont pas éluées par HCl N mais le sont par OHNa 0,2 N (Talibudeen, 1955).

D'autre part, l'adsorption d'une même protéine peut donner un espacement de 4,6 Å ou ,8.2 A. La première valeur est obtenue quand :

— la quantité de protéines disponible est limitée ;
— le pH de la suspension est au point isoélectrique ;
— les particules argileuses sont d'assez grandes dimensions.

Un échantillon à 4,6 Å séché à l'air peut être transformé de sorte que la valeur de *d* o o *l* devienne 8,2 Å en le soumettant à des conditions physiques favorables. L'inverse ne se produit que dans une limite de temps finie (max. : 8 jours). Ceci montre que la désorption est un phénomène compliqué, dont les facteurs ne sont pas nettement déterminés.

Il est intéressant de souligner également, que la structure moléculaire joue

un rôle, étant donné la taille importante des molécules. A ce sujet, TALIBUDEEN distingue (1955) :

— les protéines qui pénètrent directement, ou après modification entre les feuillets. Ce sont celles à petit poids moléculaire et de complexité minimum (salmine), ou celles à poids moléculaire plus grand mais à forme cristalline mal définie (gélatine, édestine, pepsine). Pour la gélatine par exemple, l'épaisseur déterminée aux rayons X est la même que celle d'une chaîne polypeptidique (5,6 Å). La gélatine doit donc être dénaturée avant d'être adsorbée.

— les protéines qui ne peuvent pas pénétrer entre les feuillets. Ce sont celles dont le poids moléculaire est élevé et qui possèdent un haut degré de cristallinité (virus).

b) *Adsorption des acides nucléiques et des nucléoprotéines* (GORING, BARTHOLOMEV, 1952).

Nous sommes en présence de corps où l'existence de fonctions électronégatives (groupements acides phosphates) n'entraîne pas une diminution de la fixation. Au contraire, la superposition de deux mécanismes permet une adsorption importante.

α) *Nature générale de l'adsorption.* — La vitesse d'adsorption est la même pour la kaolinite-H, l'illite-H, et la montmorillonite-H. Elle augmente avec la concentration en acide ribonucléique et quand le pH diminue. La température l'augmente peu et ne modifie pas l'équilibre final.

Avec la bentonite, celui-ci est atteint en 72 heures, approché en 24 h. Les quantités d'acide nucléique adsorbées à l'équilibre, sont maxima avec la bentonite, six fois plus faible avec l'illite, et vingt fois plus faibles avec la kaolinite.

A pH égal l'adsorption est plus grande en présence de magnésium ou de calcium qu'en présence de potassium ou de sodium. Quand le pH augmente, elle décroît moins vite avec des cations bivalents qu'avec des cations monovalents.

La taille doit aussi intervenir, étant donné que les mononucléotides sont moins adsorbés que les acides nucléiques. Les molécules pénètrent entre les feuillets comme l'indiquent les valeurs suivantes de *d* o o *l* de la montmorillonite :

Molécules	Phosphore organique adsorbé pour 100 g d'argile	*d* 0 0 *l* (Å)
Rien	—	13,5
Acide ribonucléique	8,6	14,4
Acide ribonucléique	24,0	18,3
Acide désoxyribonucléique	15	15,8
Nucléate de protamine	—	17,5

β) *Rôle des groupes cationiques.* — Il est mis en évidence par la relation qui existe entre la fixation et la capacité d'échange. De plus, les acides nucléiques qui contiennent des groupes purine et pyrimidine cationiques sont adsorbés en plus grande partie aux bas pH, comme les protéines.

L'adsorption diminue quand il y a compétition pour les sites négatifs.

	Qté fixée en g de phosphore organique/100 g de bentonite
Acides nucléiques seuls	18,1
Avec le glycocolle	15,5
Avec l'arginine	15,1

γ) *Rôle des groupes anioniques.* — Le groupe anionique est le groupement PO_4^{3-}. Son rôle peut être dû à une fixation par l'un des mécanismes indiqués par DEAN (1949). De plus, l'influence des cations échangeables est à rattacher à ce rôle.

La comparaison entre l'inositol qui ne possède pas de groupes cationiques, et l'acide ribonucléique, indique une compétition pour les sites fixateurs de phosphates. L'adsorption de ces deux substances est faite en présence et en l'absence de citrate :

Composés organiques	mg phosphore org. adsorbé/g d'argile avec citrate		mg phosphore org. adsorbé/g d'argile sans citrate	
	Kaolinite	Bentonite	Kaolinite	Bentonite
A. R. N.	0,085	6,27	0,556	14,27
Ac. guanilique	0,001	0,14	0,120	1,77
Inositol	0,013	0,24	0,488	9,62

Le citrate pourrait agir de quatre façons :

— décomposer une certaine quantité d'argile ;
— détacher de l'argile les éléments qui fixent les phosphates ;
— par action chimique ;
— par action mécanique en s'adsorbant sur les sites fixateurs de phosphates.

D'après GORING et BARTHOLOMEW, le citrate agirait mécaniquement ou en détachant certains éléments, car la fixation réduite de l'inositol ne peut être due qu'à cela.

La libération de fer et d'aluminium confirme ce point de vue.

c) *Fixation d'autres polyélectrolytes.*

Nous avions des poélylectrolytes mixtes avec les acides nucléiques, d'autres corps sont, soit des polyanions (polymétracrylate de sodium), soit des polycations (poly β-diméthylaminoéthylmétacrylate hydroacétate de sodium, bromure de polyvinylbutylpyridinium).

L'adsorption des polyanions ne provoque pas de variations de d_{001}. Il y a donc seulement fixation à la surface des particules argileuses. Celle des polycations

provoque une modification de $d\,00\,l$ (RUEHRWEIN, WARD, 1952) ; ils pénètrent donc entre les feuillets de la montmorillonite.

Quantités de polymétacrylate g/g d'argile	$d\,00\,l$ (Å)
0,035	11,8
0,665	14,4

La fixation dépend de la nature de l'argile. Pour le polymétacrylate de sodium, MORTENSEN et MARTIN ont trouvé l'ordre suivant :

Bentonite > Illite > Kaolinite.

Elle dépend aussi des ions échangeables : cations et anions, suivant l'ordre :

$Th^{4+} > Ca^{2+} > Ba^{2+} > H^{+} > K^{+} > Na^{+}$ (BERGMAN et FIEDLLER)
$F^{-} > OH > PO_4H_2^{-} > Cl^{-} > CH_3COO^{-}\ NO_3^{-} >$ polymétacrylate.

Pour les cations, l'ordre est semblable au sens lyotropique habituel (sauf pour H^{+}). Ceci s'explique par le fait que l'on a des particules qui sont toutes chargées négativement.

Il en est de même pour les anions.

Outre l'échange ionique, il faut signaler la possibilité de liaison hydrogène avec le groupement C = O (KOHL, STERLING, TAYLOR (1961)).

II — L'échange ionique est accompagné d'un autre phénomène

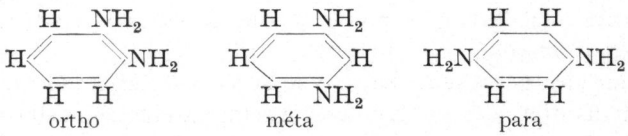
Nous avons groupé dans ce paragraphe les substances qui se fixent sur les argiles :

— soit en subissant une transformation annexe ;

— soit en s'adsorbant en quantité très supérieure à la BEC par suite de l'intervention d'un autre mécanisme que l'échange ionique.

A.— LES PHÉNYLÈNEDIAMINES

L'étude des trois dérivés, ortho, méta et para, montre l'influence des positions relatives des fonctions (HAXAIRE, 1956).



La fixation du dérivé ortho est semblable à celle de l'aniline et elle a lieu uniquement par échange ionique. Par contre, le dérivé méta et plus encore le dérivé para, se fixent non seulement par échange, mais aussi par adsorption physique :

Dérivés	Quantités fixées meq/100 g Mont^te	Δ (Å)
Ortho	74,6	3,4
Méta	100	2,6
Para	188	4,5

La position en para favorise l'oxydabilité de la molécule, et une couleur bleue apparaît lors de l'adsorption.

B. — La benzidine

1°) *Adsorption de la benzidine*

La benzidine se fixe à la fois par échange de bases et par adsorption physique. Le premier mécanisme aurait lieu jusqu'à la fixation de 70 meq/100 g d'argile, ce qui correspondrait à une couche monomoléculaire. Quand la concentration en benzidine augmente, elle se fixe en quantité supérieure à la capacité d'échange (281 meq). Les radiogrammes indiquent un espacement de 8,5 Å. D'après Haxaire, il y aurait alors trois couches monomoléculaires.

L'action de la pyridine se traduit par une désorption partielle.

L'adsorption s'accompagne de réactions secondaires qui rendent le phénomène plus compliqué.

2°) *Formation des cations semiquinone; coloration*

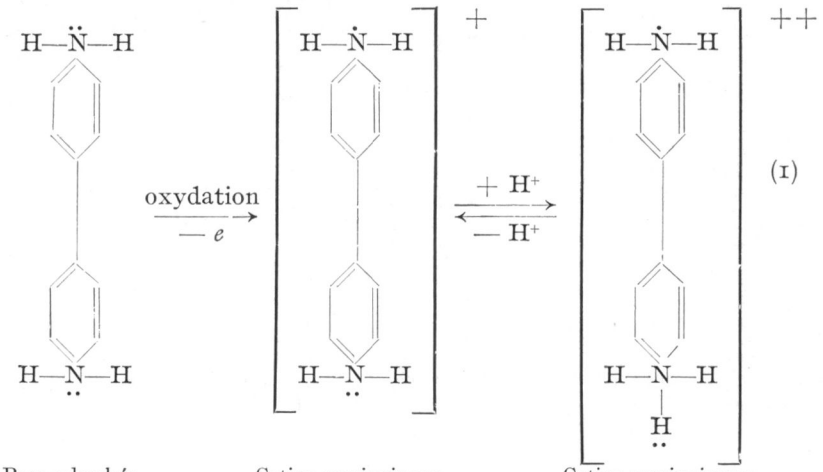
a) *Les cations semiquinone.*

Hendricks et Alexander (1940) trouvèrent que toutes les diamines capables de produire des formes semiquinones colorées par oxydation, montraient la même couleur après adsorption sur la surface de la montmorillonite. C'est ce qui se produisait pour la paraphénylènediamine.

Les semiquinones sont des composés à nombre d'électrons impair. Elles se forment par la perte d'un électron à la fin d'un système moléculaire à doubles liaisons conjuguées. Elles sont stabilisées en solution aqueuse par une énergie de résonance, et sont généralement colorées, comme beaucoup de radicaux libres.

Notons toute de suite que la benzidine n'est pas la seule substance qui donne lieu à ce phénomène. D'autres : la N. N. diméthyl-*p*-phénylène diamine, le *p*-aminophénol (Hambleton et Dodd) présentent des propriétés semblables.

La forme semiquinone de la benzidine peut se représenter de la façon suivante (DODD et SATYABRATA Ray, 1959).



b) *Oxydation.*

L'agent oxydant impliqué dans le phénomène est encore mal déterminé. Ce serait le manganèse qui se trouve à l'état d'impureté pour KAMIYAMA et OKA ; ce serait le fer de la couche octaédrique selon WEIL, MALHERNE et WEISS.

Quoi qu'il en soit, il est permis d'admettre que la surface de l'argile possède un certain nombre d'atomes dont la valence n'est pas satisfaite, en particulier aux endroits rompus (HAUSER et LEGGET, 1940). Pour compenser ce déséquilibre, un des électrons du doublet électronique libre de l'azote serait transféré dans le cristal et provoquerait ainsi l'apparition d'un champ dans la molécule aminée. Ce champ serait à l'origine de la structure quinone.

L'existence d'une réaction d'oxydation est confirmée par l'action des agents réducteurs (Cl_2Sn, HCHO) qui inhibent la coloration, alors que les agents oxydants la rétablissent. L'inhibition due aux réducteurs peut s'expliquer, par la plus grande facilité qu'ils ont de donner des électrons au réseau cristallin.

c) *Le rôle de l'eau.*

Le rôle de l'eau adsorbée est schématisé par la réaction :

$$B^+ + (H_3O)^+ \rightleftharpoons Y^{2+} + H_2O \quad (2)$$

La formation du complexe en présence d'eau fait apparaître la couleur bleue et la distance basale est d 0 0 1 = 15 — 19 Å. Quand il est formé en l'absence d'eau il n'y a pas de coloration et d 0 0 1 = 13 — 14 Å (TAKAHASHI-HIROSHI, 1955).

D'autre part, la couleur varie en fonction de la quantité d'eau.

L'addition de solutions aqueuse, alcoolique et cétonique de benzidine à de la montmorillonite chauffée à 300-400° montre une intensité de couleur croissante dans le sens :

cétone < alcool < eau

Ceci peut être attribué à la facilité qu'a le solvant de donner des protons.

Il a été observé (HAUSER et LEGGETT, 1940) que l'intensité de la couleur dépendait de la nature de l'argile suivant l'ordre :

Silicagel < Illite < Kaolinite < Terre à foulon < Bentonite.

Les propriétés différentes de l'eau d'hydratation de ces divers minéraux pourraient en être responsables.

d) *L'acidité de surface.*

ALEXANDER et HENDRICKS observent la couleur bleue à pH 4, alors que MIELENZ et KING observent la couleur jaune à pH 1. L'équilibre (2) est déplacé vers la droite quand le pH diminue. Aux pH intermédiaires, il y aurait un mélange des deux formes.

DODD et SATYABRATA-RAY constatent que la quantité de cations fixés croît avec le pH et les valeurs trouvées correspondent mieux à la capacité d'échange pour des pH supérieurs à 5. Notons que deux causes sont responsables de l'augmentation de la fixation :

— La transformation des cations monovalents quand le pH croît.

— la plus grande facilité d'échange.

En effet, les auteurs précédents distinguent deux catégories de sites d'échange :

— les sites à haute énergie toujours occupés par des cations échangeables aux pH < 5 ;

— les sites à énergie plus faible aux pH ⩾ 5.

Certains, enfin, pensent qu'une trop grande acidité de surface nuirait à la réaction d'oxydation (1).

C. — LES COLORANTS

De nombreuses matières colorantes sont susceptibles de se fixer sur la surface des argiles. Elles peuvent se diviser en deux groupes :

— colorants cationiques présentant des radicaux plus ou moins basiques.

— colorants anioniques présentant des radicaux plus ou moins acides.

Les premiers se fixent rapidement et complètement sur les montmorillonites Na et H et ne peuvent pas s'éluer (KAYSER et BLOCH 1952). Quand le caractère basique est atténué par la présence de radicaux SO_3H et OH (Hélianthine, diazocarbamate), la fixation est moindre.

Les seconds (Vert Guiné, Indigosulfonate de sodium) ne se fixent pas ou peu et sont facilement élués.

D'une façon générale (KAISER et BLOCH, 1952) :

— avec la montmorillonite Na, la coloration est analogue à celle développée en milieu alcalin.

— avec la montmorillonite H, la coloration ne change pas s'il n'y a pas d'absorption. Elle varie, s'il y a adsorption, suivant deux facteurs : le pH et l'état d'hydratation.

1. — *Fixation du rouge neutre.*

HAXAIRE (1956) étudia la fixation de ce colorant sur la montmorillonite Na. Comme nous l'avions observé pour d'autres corps, il y a d'abord échange ionique,

puis adsorption physique. La quantité totale fixée est de 215 meq/100 g, mais avec des solutions concentrées, cette quantité atteint 330 meq.

Cependant, lors de l'échange ionique, tout le sodium ne se déplace pas. Il a été montré que l'aniline pouvait se fixer par échange ionique, même quand une quantité suffisante de rouge neutre pour couvrir la surface est adsorbée. D'autres auteurs pensent que les cations métalliques deviennent non échangeables (EMODII).

L'adsorption sur la montmorillonite — H (KAYSER et BLOCH, 1953) est différente. Il se fixe 111 meq (la BEC étant 93 meq/100 g) et l'acidité libérée est seulement de 1,8 meq. De plus, les ions H^+ ne sont pas échangeables même avec une solution saline concentrée (acétate de magnésium à 5 p. 100).

Le rouge neutre aussi se fixe sur une montmorillonite saturée par une amine grasse (monométhylamine). Il se fixe ainsi 184 meq.

Nous pouvons donc constater que les protons se manifestent par des propriétés différentes comparativement au sodium et aux cations organiques. Ils ne permettent pas une très forte fixation du colorant et subsistent dans le complexe où ils se trouvent peut-être engagés.

La désorption du rouge neutre est longue et n'est jamais totale, même avec la pyridine qui est le meilleur agent d'extraction. Seule la couche fixée par échange ionique reste adsorbée.

Enfin, il est intéressant de signaler que le rouge neutre devient bleu en milieu concentré. De plus, un chauffage léger du complexe provoque l'apparition de cette couleur. Là encore, l'état de l'eau semble être responsable de ces variations.

2. — *Les autres colorants.*

Le bleu de méthylène, la phénothiazine, le vert malachite, le violet hexaméthylé, la thiacyne, la triméthilethiacyne se fixent aussi sur la montmorillonite (HAXAIRE, 1956). Pour tous, l'échange ionique se produit d'abord, puis la capacité d'échange étant saturée ou presque, il a y adsorption physique.

Les molécules fixées par échange d'ions sont également fortement retenues.

D. — LES PROPRIÉTÉS CATALYTIQUES DE LA MONTMORILLONITE

Les paragraphes précédents nous amènent à parler des propriétés catalytiques des particules argileuses. Au voisinage des feuillets, les interactions avec les protons sont facilitées. On peut également citer d'autres exemples.

La montmorillonite H catalyse l'inversion du saccharose (KAYSER et BLOCH, 1952). En effet, une solution de ce sucre mise au contact de l'argile pendant quelques heures, ne donne pas de réaction avec la liqueur de Fehling à chaud, alors que de l'oxyde cuivreux se forme sur les feuillets. Le saccharose s'est donc inverti sous l'influence des protons de la surface.

Les montmorillonites H ou Na permettent d'effectuer certaines synthèses. L'addition d'aniline et de formaldéhyde à une suspension aqueuse de montmorillonite-Na, par exemple, donne naissance par dessiccation à un pigment jaune orangé. De même, l'acide sulfanilique s'obtient à froid par action de SO_4H_2 sur l'aniline préa-

lablement fixées ur la montmorillonite-H. Dans l'étude de l'acétylation de la montmorillonite, GREENLAND et RUSSEL (1955) constatent un effet catalytique de l'argile qu'ils attribuent aux atomes d'aluminium. Ce phénomène prend naissance en chauffant et se manifeste par l'apparition de carbone sous une autre forme que le radical acétyle. Ils se produirait une polymérisation. Il faut rapprocher de ce fait l'observation de MARTIN, VIVALDI et HENDRICKS selon laquelle il se formerait des hydrocarbures quand une argile-H est traitée par le diazométhane. Enfin, signalons que la montmorillonite permet la recoloration des leucodérivés.

Nous voyons donc que la surface de l'argile présente des propriétés intéressantes. Cependant, elles se manifestent presque toujours simultanément et les produits obtenus sont le plus souvent non isolables.

III — Conclusion

Le caractère basique des molécules organiques permet leur fixation par échange ionique. Elle est d'autant plus importante que la basicité est élevée. Quand celle-ci est atténuée par des fonctions électronégatives, l'adsorption diminue, à moins qu'un autre mécanisme n'intervienne comme pour les nucléoprotéines.

Pour simplifier l'exposé, nous avons établi une distinction entre la fixation par échange ionique et la fixation par adsorption physique. En fait, il s'agit certainement plus de phénomènes coexistants que de phénomènes successifs. Il en en résulte qu'une fixation inférieure ou équivalente à la BEC n'est pas entièrement due à l'échange ionique, celui-ci n'étant que dominant.

Il est très intéressant de souligner le rôle de l'eau, dont les manifestations semblent liées à son état au voisinage des feuillets argileux.

CHAPITRE II

COMPLEXES FORMÉS A PARTIR DES MOLÉCULES NON IONISÉES

La formation des complexes à partir des molécules non ionisées correspond à ce que nous avons appelé l'adsorption physique. Plus encore que pour les molécules ionisées, de nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer la formation de ces complexes. La difficulté de trouver une explication suffisamment générale est accrue par le nombre des expériences faites, pour la plupart, dans des conditions très différentes les unes des autres.

Les molécules aliphatiques comme les molécules cycliques sont susceptibles de se fixer sur les argiles autrement que par échange d'ions. Elles possèdent des fonctions variées : alcool, cétone, aldéhyde, nitrile...

La caractéristique générale des substances ainsi fixées, est leur nature polaire. Quand ce caractère diminue, la fixation diminue aussi (BRADLEY, MACEWAN, TALIBUDEEN). C'est d'ailleurs pour cette raison, probablement, que les hydrocarbures se fixent difficilement, ou même pas du tout.

Là encore, nous étudierons surtout les complexes de la montmorillonite. Toutefois, nous signalerons les particularités qui les distinguent de ceux formés avec les autres types d'argiles.

I — Adsorption interlamellaire

Précisons tout de suite que les hydrocarbures aliphatiques ne forment pas de complexes (MACEWAN, 1948). En effet, les distances basales trouvées avec le *n*-heptane et le *n*-hexane sont de 10 Å et 11-12 Å respectivement ; le faible écartement des feuillets étant dû à l'eau résiduelle. Les hydrocarbures cycliques se fixent cependant mais peu de détails sont donnés à leur sujet.

Les molécules organiques neutres, y compris les hydrocarbures cycliques pénètrent entre les feuillets en les écartant. Comme les cations minéraux pouvaient être remplacés par des cations organiques, l'eau adsorbée peut elle aussi, être remplacée par des molcéules organiques neutres (MACEWAN, 1949). Ainsi quand celles-ci se fixent, une partie de l'eau est expulsée et les intervalles entre feuillets sont modifiés. L'étude des diagrammes de diffraction des rayons X sera donc très utile.

Sauf de rares exceptions, les molécules se fixent en un nombre entier de couches monomoléculaires. Ce nombre varie avec la longueur de la chaîne carbonée et la nature des fonctions qu'elle porte. Par exemple, MACEWAN (1948) a comparé les complexes formés par deux substances différentes sur deux argiles différentes (fig. 16).

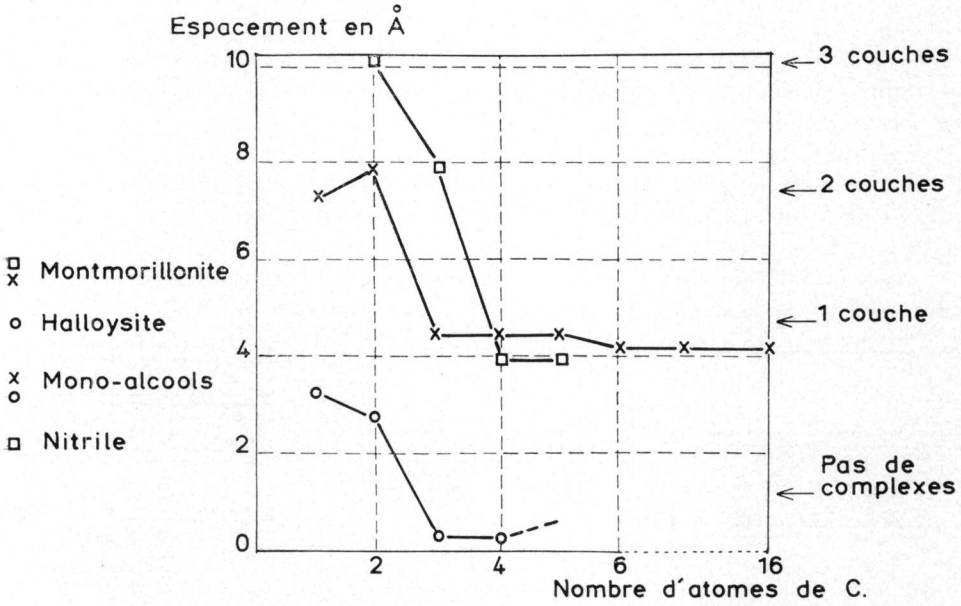


FIG. 16. — *Variations de l'espacement interlamellaire en fonction de la taille des molécules adsorbées* (MACEWAN, 1948)

Les résultats sont donc variables suivant la nature de l'argile et des molécules organiques.

Lors de la formation des complexes :

— les feuillets s'écartent;

— l'eau, et toute autre substance, si elles sont abondantes sont expulsées;

— des liaisons doivent se créer entre la surface de l'argile et les molécules organiques.

Enfin, on peut penser, à priori, que des liaisons intermoléculaires pourront aussi se former, et modifier l'état des substances ainsi adsorbées.

II — Les mécanismes de formation des complexes

A. — RÔLE DE LA POLARITÉ DES MOLÉCULES

DEBYE a montré qu'il existait des molécules non ioniques, mais polaires, par suite d'une distribution dissymétrique des électrons. Il en résulte que les centres de gravité des charges positives et négatives sont différents, d'où l'existence d'un moment dipolaire. Étant donné que les feuillets de l'argile portent des charges électriques, des forces d'attraction ou de répulsion peuvent naître entre eux et les molécules.

1. *La fixation des molécules.*

BRADLEY et MACEWAN (1948) ont trouvé que les molécules polaires étaient adsorbées différemment sur la montmorillonite et l'halloysite. Cette dernière diffère par les points suivants :

— il ne se forme jamais plus d'une couche interlamellaire ;

— les substances susceptibles d'être adsorbées sont beaucoup moins nombreuses ; ce sont celles qui possèdent un grand nombre de groupes polaires par rapport à celles qui sont neutres.

Avec la montmorillonite, les corps polaires peuvent former plus de deux couches, ceux qui ne le sont pas ne peuvent en former qu'une.

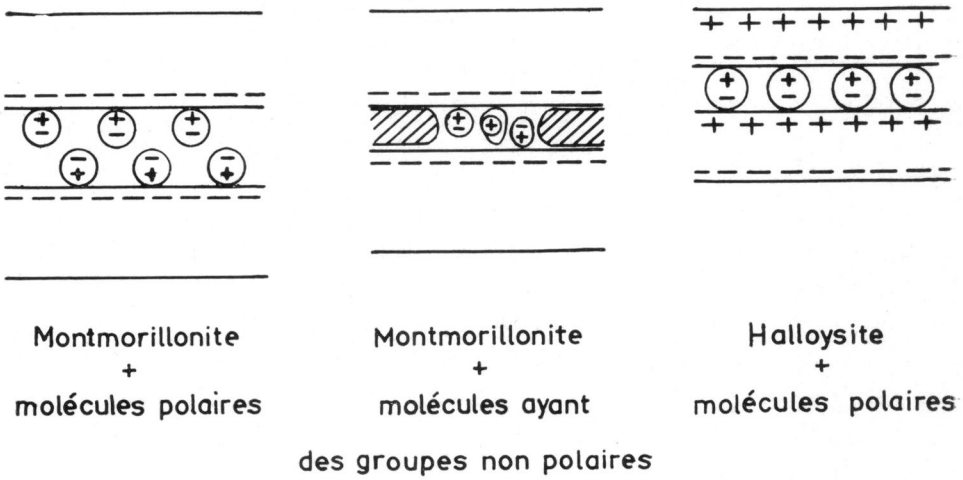


FIG. 17. — *Orientation des molécules polaires sur la surface des feuillets de la montmorillonite et de l'halloysite* (BRADLEY, MACEWAN, 1948)

L'explication des comportements différents de ces deux argiles peut se trouver dans les propriétés des feuillets. En effet, les surfaces voisines sont identiques dans la montmorillonite, et différentes dans l'halloysite. Dès lors, les charges qu'elles portent, sont elles aussi identiques dans la première et différentes dans la deuxième. Par conséquent, les molécules polaires, dans lesquelles il existe un pôle positif et un pôle négatif, vont s'orienter de telle sorte que les charges de signe opposé soient le plus près l'une de l'autre. Il est alors évident que les molécules ne peuvent former qu'une couche avec l'halloysite, et deux avec la montmorillonite. Le schéma de la figure 17 illustre ce fait.

Étant donné que les feuillets chargés de la montmorillonite sont maintenus ensemble par des ions positifs, il en résulte que l'énergie de formation d'un complexe, type complexe de VAN DER WAALS, n'est certainement pas suffisante pour provoquer cet écartement (MACEWAN). Cependant, la présence des groupes polaires permet :

— l'écartement des feuillets ;

— la diminution du champ électrique des ions minéraux.

Il nous faut donc étudier les propriétés polaires des corps organiques.

2. — *Influence du moment dipolaire et de la constante diélectrique*

a) *Expériences.*

Expérience n° 1. — La montmorillonite est additionnée de substances pures ayant des constantes diélectriques différentes. Ce sont des alcools normaux, des alcools polyhydriques et des cétones. Quand le nombre de groupements CH_2 de la molécule augmente, la constante diélectrique diminue. L'écartement des feuillets passe par plusieurs stades (BARSHAD, 1952).

— passage d'une couche bimoléculaire (avec le méthanol et l'éthanol) à une couche monomoléculaire (du propanol à l'octanol).

— passage d'une couche monomoléculaire à une couche beaucoup plus épaisse et constituée de plusieurs molécules superposées ou de molécules perpendiculaires aux feuillets (nonyl et décylalcool).

— passage de cette couche mal définie à une couche monomoléculaire ou peut-être à un état de non-expansion (tétradécylalcool).

Remarque : A l'influence de la constante diélectrique s'ajoute celle de la taille des molécules qui conditionne leur orientation entre les feuillets. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

Des observations analogues ont également été faites, sur la vermiculite par WALKER (1950).

Expérience n° 2. — L'argile est additionnée d'un mélange de deux substances dont la constante diélectrique dépend de la composition :

Mélanges	Constante diélectrique à 25°C	*d* 0 0 *l*
70 % de décanol + 30 % de *n*-pentane	4	33,2
20 % de décanol + 80 % de *n*-pentane	2,5	14,9

L'effet de la constante diélectrique est ici très net. L'addition de *n* pentane a les mêmes conséquences que l'augmentation du nombre de CH_2.

Expérience n° 3. — Elle a pour but de vérifier l'influence du moment dipolaire :

b) *Interprétation.*

BARSHAD pense que la formation des complexes avec la montmorillonite doit suivre les mêmes lois que celles des autres complexes. En accord avec ces lois, l'énergie de réaction ou la force d'attraction entre ions formant le complexe, est proportionnelle au moment dipolaire et inversement proportionnelle à la constante diélectrique des substances réagissantes.

L'expérience n° 3 montre que l'expansion augmente effectivement avec le moment dipolaire. La distribution des électrons dans la molécule dépend de la position des radicaux substitués sur le noyau benzénique. La fixation est d'autant plus impor-

tante que cette distribution est dissymétrique. Ces considérations permettent d'expliquer les chiffres du tableau précédent, ainsi que les observations de COWAN et WHITE (1962) au sujet des crésols. L'adsorption pour ces derniers est conforme à l'ordre suivant :

paracrésol > métacrésol > orthocrésol

Expérience n° 3

Complexes	Moment dipolaire	*d*00*l*
Montmorillonite Ca :		
+ Benzène seul	—	—
+ Benzène + *p*-nitrobenzène	0,3	13,4
+ — + *m*-nitrobenzène	3,7	15,1
+ — + *o*-nitrobenzène	6	15,1
+ glycérol	— 2,8	16,8
+ acétonitrile	3,13	17
+ nitrométhane	3,51	19,3
Nitrobenzène pur	4,24	15,2

L'interprétation de l'influence de la constante diélectrique est beaucoup plus délicate. BARSHAD (1952) considère le rôle dualiste des corps organiques :

— ceux-ci servent de milieu séparant les feuillets ; plus la constante diélectrique est grande, moins sont importantes les forces des liaisons interfeuillets.

— ceux-ci forment le complexe ; dès lors, plus la constante diélectrique est faible, plus l'association aura tendance à se faire ; autrement dit, plus le complexe aura tendance à se former.

En fait, donc, tout dépend de l'importance relative des forces existant entre les feuillets, ou entre ceux-ci et les molécules. Tant que les forces d'attraction entre les feuillets prédominent, l'espacement doit augmenter avec la constante diélectrique. Quand les forces entre les feuillets et les molécules deviennent plus grandes, par suite, en particulier, d'un fort moment dipolaire, l'espacement augmentera malgré une faible constante diélectrique. C'est ainsi que la valeur de *d* o o *l* croît quand on passe du tétradécyl aux nonyl et décylalcool, car le moment dipolaire de ces corps est assez faible, laissant dominantes les interactions entre feuillets. D'un autre côté, l'expérience n° 3 montre dans ce cas que les forces d'attraction entre feuillets et molécules sont les plus importantes et interviennent seules, ou presque.

B. — ÉLECTRONS π ET FORCES DE VAN DER WALLS

Plusieurs auteurs ont supposé que la fixation des molécules était due à des forces de VAN DER WALLS. HAXAIRE (1956) en particulier, a émis l'hypothèse que les substances cycliques qui se fixent en quantités supérieures à la capacité d'échange de bases, pouvaient être retenues par l'intermédiaire de ces forces.

Ces forces sont proportionnelles au nombre d'électrons π et inversement propor-

tionnelles à la septième puissance de la distance entre les molécules adsorbées et la surface de l'argile. Se basant sur ce fait, HAXAIRE trouva qu'il existait une relation entre la valeur du rapport : Écartement des feuillets en Å/nombre d'électrons π de la molécule adsorbée, et l'importance de l'adsorption. Le graphique suivant exprime cette relation (fig. 18).

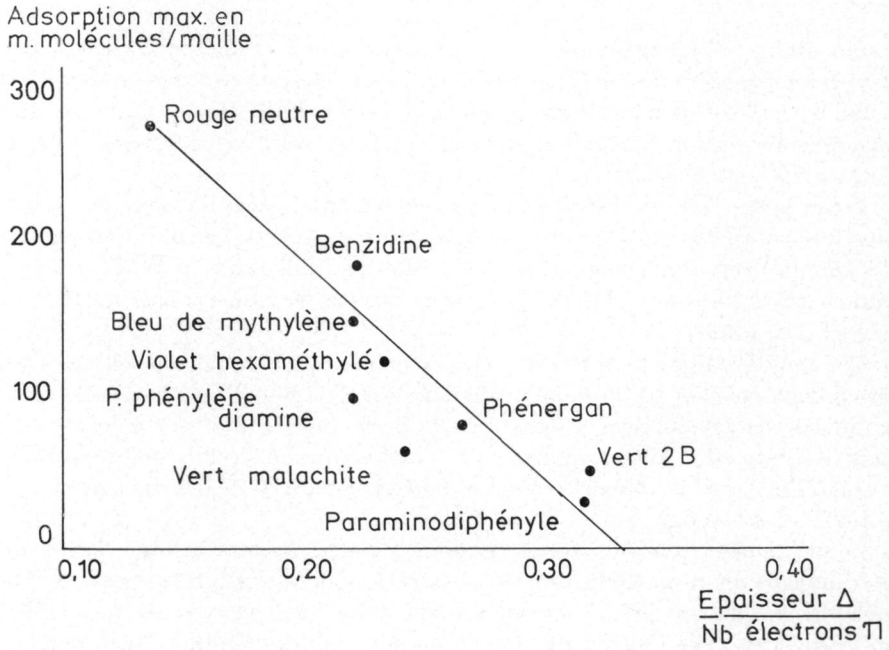


FIG. 18. — *Influence du rapport : nombre d'électrons de la molécule sur l'adsorption de différentes molécules* (HAXAIRE, 1956)

En fait, ce résultat n'est pas général. De plus, il semble délicat d'affirmer que ces forces sont suffisamment effectives pour expliquer la stabilité des complexes ; d'autres phénomènes doivent intervenir.

C. — NATURE DES LIAISONS ENTRE LES MOLÉCULES ET LES FEUILLETS

Nous savons que la surface des feuillets de la montmorillonite est couverte d'atomes d'oxygène, atomes qui sont électrophiles. Étant donné que dans une molécule polaire la distribution des électrons est perturbée, on peut penser que certaines liaisons pourront s'établir entre les atomes de la molécule et la surface de l'argile.

MACEWAN (1948) constate que l'espacement interlamellaire est de 3,4 Å avec le méthanol. Or, le rayon de VAN DER WALLS du radical CH_3 est de 4 A. Il pense avec BRADLEY (1945 *a*, 1958), qu'il peut exister, de ce fait, une liaison C—H...O. En effet, la liaison C—O dans le méthanol, est assez polarisée ; elle laisse l'atome de carbone avec un déficit d'électrons. Les atomes d'hydrogène sont alors chargés positivement

et sont attirés par les atomes d'oxygène de la surface. Ce phénomène est illustré dans le schéma suivant :

$$\begin{array}{c} H \\ \downarrow \\ \rightarrow C \rightarrow O \leftarrow H \\ \uparrow \\ H \end{array}$$

les flèches indiquent le déplacement des électrons.

Un atome d'hydrogène de CH_3 peut contracter une liaison avec les atomes d'oxygène superficiels. De plus, l'atome d'hydrogène alcoolique peut lui aussi contracter une liaison, soit comme précédemment, soit avec les (OH) des autres molécules d'alcool. Nous verrons d'ailleurs que dans certaines conditions ces dernières liaisons peuvent être importantes.

Cependant, l'activité électrophile de l'atome d'oxygène devient de moins en moins intense au fur et à mesure que le nombre de CH_2 augmente. Ceci car l'effet inducteur décroît rapidement quand on s'éloigne de l'atome actif. Plus cet effet diminue, moins les atomes d'hydrogène seront positifs, et moins la liaison CH...O aura tendance à se former.

Ces considérations permettent d'expliquer pourquoi les polyalcools ne s'adsorbent en deux couches sur la montmorillonite que si le nombre d'atomes de carbone par radical OH est inférieur à deux. Quand il est supérieur, il ne se forme qu'une couche. Ce fait est d'ailleurs appuyé par l'augmentation de la stabilité thermique des complexes avec le rapport : nombre de OH/nombre d'atomes de carbone (TETTENHORST et *al.*, 1962).

Le phénomène étudié à propos des alcools peut s'étendre à toute autre molécule contenant un atome inducteur. Les esters, les polyesters forment des complexes semblables à ceux formés par les polyalcools, donnant deux couches avec la montmorillonite, une avec l'halloysite. Il en est de même des cétones, des aldhéhydes, des nitriles et des composés nitrés. Pour tous ces corps, on constate une contraction de la distance C—H...O, contraction attribuable à une liaison du type C—H...O (BRADLEY-MACEWAN).

De plus les groupes C = O (KOLH et *al.*, 1961) et C ≡ N doivent être regardés comme des ensembles très inducteurs, attirant les électrons du carbone auquel ils sont liés. On peut penser que cela est dû à la haute polarisation des liaisons multiples, telle que l'illustrent les formules mésomères limites suivantes :

$$\overset{+}{C} \cdots \overset{-}{O} \qquad \overset{+}{C} \cdots \overset{-}{N}.$$

MACEWAN note que l'effet de C ≡ N est plus grand que celui de C = O. Cela permet d'expliquer l'existence d'un complexe à deux couches avec l'acétone et d'un complexe à trois couches avec le nitrométhane.

Enfin, les halogènes substitués doivent aussi faciliter ces liaisons. C'est ce que montre le chloroéthane qui donne les mêmes complexes que le glycol.

Remarque : Des facteurs stériques peuvent masquer des liaisons C—H...O. Le propanediol 1-3 donne un plus grand espacement que l'éthylène glycol, alors que l'on pourrait s'attendre au contraire, vu ce qui précède. En fait, ceci est dû à la présence d'un groupe central CH_2 qui occupe une place supplémentaire. Le

dioxane présente un phénomène semblable car la nature cyclique de la molécule empêche probablement les atomes de carbone d'être tous dans une position favorable.

La formation de ces liaisons implique une condition : étant donné les hypothèses faites sur l'état de l'eau dans les argiles, il faut admettre que l'énergie des liaisons entre les atomes d'hydrogène et la surface silicatée, est au moins comparable à celle des liaisons O—H...O du système avec l'eau (BRADLEY, 1954 *a*).

Toutes ces hypothèses permettent d'expliquer un certain nombre de faits expérimentaux. Cependant, elles ne rendent pas compte de l'influence de la capacité d'échange des argiles, pas plus que du rôle des cations échangeables. Il faut donc faire appel à d'autres mécanismes.

D. — RÔLE DES CATIONS ÉCHANGEABLES

Il a été observé par de nombreux auteurs (GLAESER, MERING, BARSHAD, GREENE-KELLY). Deux points sont essentiels : les cations peuvent participer à l'écartement des feuillets et à la formation des complexes eux-mêmes.

1. *Écartement des feuillets*

Il faut rappeler les considérations de MERING et GLAESER (1953) sur la neutralisation locale des charges négatives par les cations minéraux. Dans les argiles, les substitutions isomorphiques font apparaître des charges négatives, et les cations

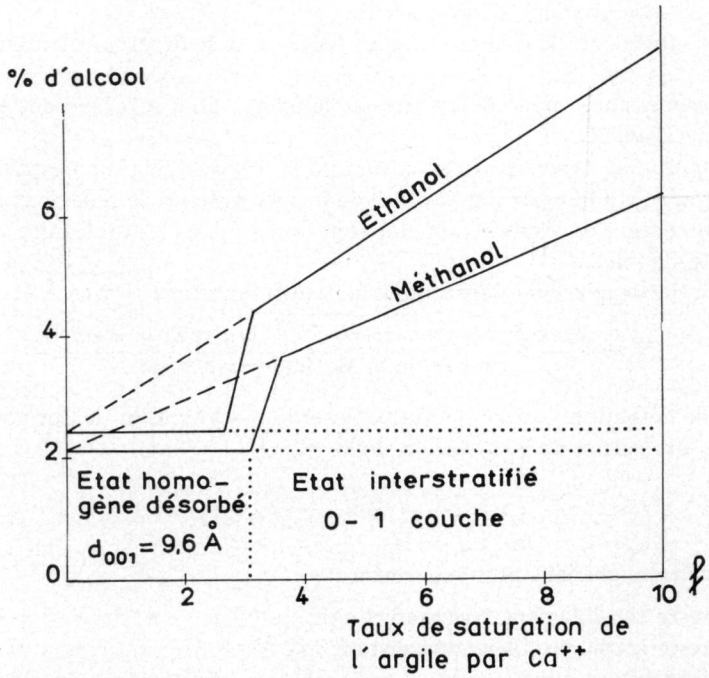


FIG. 19. — *Influence du taux de saturation de la montmorillonite par le calcium sur la fixation du méthanol et de l'éthanol* (MERING, GLAESER, 1953).

monovalents comme le sodium, peuvent les neutraliser localement. Cependant, la répartition de ces charges est telle, que certaines sont éloignées, d'autres assez rapprochées pour qu'un cation bivalent comme le calcium, puisse en neutraliser deux. Par conséquent, si l'on appelle α, la fraction des positions des cations voisines de deux charges négatives, et f la fraction de la capacité d'échange saturée par le calcium, on peut s'attendre :

— pour $f < \alpha$, à un comportement identique du calcium et du sodium.
— pour $f > \alpha$, à un comportement différent des deux cations.

Ce fait est bien vérifié par la fixation du méthanol et de l'éthanol (fig. 19).

L'effet du calcium ne se manifeste qu'à partir de $f > \alpha$. A ce moment, les feuillets de l'argile s'écartent plus facilement. De plus, les ions Ca^{2+} ont alors tendance à s'incorporer dans la couche de solvatation. Ceci n'existe que dans la mesure où les cations ne participent pas, ou peu, à la neutralisation des charges de l'argile.

2. — *Participation à la formation des complexes*

a) *Expériences.*

Glaeser (1954) a étudié la formation de complexes à partir de différentes molécules. L'adsorption de celles-ci étant réalisée, les complexes sont soumis à la désorption. Les échantillons sont ensuite étudiés par diffraction des rayons X. Trois cas peuvent se produire :

— Les substances ne pénètrent pas entre les feuillets, et sont seulement fixées sur la surface des particules (notation S).

— Les substances pénètrent entre les feuillets et se désorbent lentement (notation D-L) ;

— Les substances pénètrent entre les feuillets et ne se désorbent pas ; il y a rétention (notation R).

La rétention se caractérise par la non variation des diagrammes de rayons X. La désorption se traduit par l'apparition de formes diffuses de réflexions et de séries o o l irrationnelles. Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux 1 et 2.

Dans le deuxième :

N : nombre de molécules organiques par maille unitaire $a = 5{,}19$ Å et $b = 8{,}98$ Å;

$$N = \frac{(\textit{taux de rétention corrigé}) \times (\textit{Masse de la maille})}{\text{Masse de la Molécule organique}}.$$

Taux de rétention corrigé = (taux observé) — (fixation de surface)
σ = projection de la molécule sur le plan.

$$A = \frac{5{,}19 \times 8{,}98}{N}.$$

Ces résultats amènent plusieurs remarques :

— N reste sensiblement constant (1,25) ;
— A reste aussi sensiblement constant (35 Å²)
— A est toujours supérieur à σ. Les couches moléculaires retenues ne sont donc pas compactes.

TABLEAU I

Molécules	Montmorillonite Na		Montmorillonite Ca		Montmorillonite H	
	Taux en % d'argile calcinée		Taux		Taux	
Méthanol	1,7	S	6,2	R	—	R
Éthanol	2,7	S	11,0	R	11,7	R
Propanol	—	DL	15,3	R	—	R
Isopropanol	3,3	S	14,2	R	—	R
Butanol	—	DL	16,0	R	—	R
Cyclohexanol	—	DL	29,2	R	—	R
Acétone	—	DL	13,6	R	12	R
Cyclohexanone	18,8	R	22,9	R	—	R
Dioxane	12,6	R	23,0	R	—	R
Acide acétique	8,5	R	16,2	R	16,1	R

TABLEAU 2

Molécules	N	Aire moléculaire spécifique Å² A	Aire de Van der WALLS de la molécule en Å² σ
Méthanol	0,98	47,5	15,4
Éthanol	1,25	37,3	19,7
Propanol	1,32	35,3	24,4
Isopropanol	1,26	37	24
Butanol	1,12	41,5	30
Cyclohexanol	1,14	40,8	36,6
Dioxane	1,25	37,3	22,5
Ac. acétique	1,40	33,3	22,5

Les mêmes observations sont faites avec la montmorillonite — Na, avec N = 0,75.

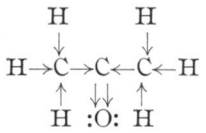
L'influence des cations échangeables apparaît avec d'autres expériences. SERVAIS (1960) a montré que les diamines en solutions concentrées se fixaient sous forme de molécules neutres, cette fixation augmentant quand on passe du sodium au calcium. Les complexes du glycérol dépendent également de la nature des cations (BARSHAD, 1950).

b) *Interprétation.*

La constance de la densité moléculaire est un fait important. Elle conduit à l'idée que les molécules se groupent autour d'un nombre fixe de centres actifs.

La montmorillonite-Na permet d'interpréter plus facilement les résultats, car

elle ne fixe pas toutes les molécules. Seules le sont, dans ces expériences, celles qui possèdent la fonction cétone (cyclohexanone, dioxane, acétone). La présence d'un groupement C = O induit un fort moment dipolaire, comme nous le savons, et l'atome d'oxygène peut facilement céder des électrons :



déplacements des électrons dans l'acétone.

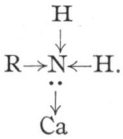
Ce sont donc les propriétés de donneurs d'électrons qui interviennent et il est évident que l'atome d'oxygène de la fonction cétone possède cette propriété à un plus haut degré que celui de la fonction alcool.

Ces considérations impliquent l'existence d'accepteurs d'électrons. Ce rôle serait dévolu aux cations échangeables. La tendance d'un cation à capter un électron est mesurée par le potentiel d'ionisation de l'atome correspondant. Les potentiels des atomes étudiés sont :

H : 13,5 volt ;
Ca : 11,8 volt ;
Na : 5,1 volt.

D'autre part, nous savons que les protons et les ions calcium sont mobiles. Ces deux propriétés peuvent donc expliquer la stabilité des couches de solvatation. Les complexes se formeraient par suite de l'association des molécules organiques et des cations échangeables.

Les complexes aminés obtenus par SERVAIS s'expliquent aussi par ces considérations. L'atome N peut donner, en effet, deux électrons à un cation, qui sera de préférence le calcium :



C'est à ces faits que l'on peut attribuer les différences de comportement entre la montmorillonite sodique et la montmorillonite calcique.

Remarque : Dans la molécule organique, l'atome donneur d'électrons a aussi un effet inducteur. Il est donc possible que des liaisons C—H...O se créent comme nous l'avons vu précédemment.

GLAESER a vérifié cette hypothèse en prenant un cation lourd dépourvu de mobilité mais dont l'atome correspondant possède un potentiel d'ionisation intermédiaire entre ceux du calcium et du sodium : l'argent (pot : 7,5 volt). Les alcools qui ne se fixaient pas sur la montmorillonite-Na, se fixent sur la montmorillonite-Ag, et ceux qui s'y fixaient y sont retenus de façon intermédiaire. Cette expérience complémentaire confirme donc les idées émises. Plus le champ électrostatique est grand, plus le complexe formé sera stable.

Cependant, nous avons vu que les amines pouvaient se fixer en quantité supé-

rieure à la capacité d'échange (SERVAIS, WEY, SIESKIND, HAXAIRE). Cette observation peut s'expliquer par la réaction suivant (SERVAIS, 1960) :

$$\left(\begin{array}{c} NH_3^+ \\ \diagdown \\ R \\ \diagup \\ NH_3^+ \end{array}\right)_{\text{ads}} + \left(\begin{array}{c} NH_2 \\ \diagdown \\ R \\ \diagup \\ NH_2 \end{array}\right)_{\text{en excès}} \longrightarrow 2 \left(\begin{array}{c} NH_2 \\ \diagdown \\ R \\ \diagup \\ NH_3^+ \end{array}\right)_{\text{ads.}}$$

à condition que les valeurs des pK_b le permettent.

Enfin, il semble évident, à priori, que la capacité d'échange de l'argile influence l'importance des complexes formés. GLAESER a vérifié ce fait, en réalisant des adsorptions sur deux types de montmorillonite :

— Montmorillonite de Camp Berteau : BEC = 116 meq/100 g ;
— Montmorillonite du Wyoming : BEC = 75 meq/100 g.

Les résultats montrent que les taux de rétention sont toujours plus faibles sur la deuxième.

E. — RÔLE DE L'EAU

Le solvant généralement utilisé est l'eau, et son importance a été maintes fois observée. Nous avons déjà signalé que l'eau était déplacée par les molécules organiques (BRADLEY), et que ce déplacement n'avait lieu que sous certaines conditions énergétiques.

MACKENZIE a étudié l'influence de l'eau sur les complexes du glycol et a constaté qu'elle pouvait contribuer à leur formation, sans toutefois être nécessaire. GLAESER (1948) arrive à des conclusions légèrement différentes en ce qui concerne les complexes avec l'acétone. En milieu presque anhydre, l'espacement est de 3,7 Å à 3,9 Å et correspond à une couche monomoléculaire. En présence de vapeur d'eau saturante, cet espacement devient de 15,1 Å ce qui est un peu inférieur à l'épaisseur de quatre couches.

Dans les expériences que nous avons précédemment rapportées, le solvant utilisé était l'eau. Si celle-ci est remplacée par l'éther, il ne se forme pas de complexe homogène.

Les propriétés polaires de l'eau doivent probablement intervenir, mais il est actuellement difficile de préciser leur importance.

III — Conclusion

Les différentes hypothèses que nous avons rencontrées ne s'excluent pas les unes les autres. Les données qu'elles apportent permettent d'expliquer la formation des complexes tout en tenant compte des faits expérimentaux.

On peut distinguer deux étapes :

— Écartement des feuillets.
— Fixation de la molécule.

La première étape serait due à la fois aux propriétés diélectriques des substances, et aux cations échangeables : ces deux facteurs contribuant à diminuer les forces d'attraction entre les feuillets argileux. La deuxième se ferait par l'intermédiaire des cations échangeables ou de liaisons directes entre les molécules et la surface de l'argile. Ces associations dépendraient essentiellement de la mobilité des électrons dans la molécule, et des propriétés électriques des cations.

CHAPITRE III

FORMATION DES COMPLEXES PAR RÉACTION CHIMIQUE

Nous avons déjà signalé que la surface de l'argile possédait des groupements (OH) susceptibles de prendre part à une réaction chimique. Cependant, on peut penser que la montmorillonite peut elle aussi présenter de semblables propriétés.

La synthèse des dérivés organiques possédant divers radicaux (acétyle, phényle, méthyle, chlore) fut tentée par de nombreux chercheurs. Deux thèses s'affrontent quant à l'interprétation des résultats obtenus. Pour certains (GIESEKING, SPENCER, SLABAUGH, DEUEL et FRIPIAT) il se produit vraiment une réaction entre les hydroxyles superficiels et les agents chimiques. Pour d'autres (GLAESER, RUSSEL, GREENLAND) il ne s'agit que de complexes d'adsorption.

Nous parlerons des expériences qui ont conduit à chacune des deux thèses et nous soulignerons les arguments qui les soutiennent ou les infirment.

I — Réactions chimiques avec la surface de l'argile

A. — ACÉTYLATION DE LA KAOLINITE

L'étude de l'acétylation des alumino-silicates (UYTTERHOEVEN, 1959) a montré qu'il se formait des liaisons du type : $\equiv SI—O—COH_3$ et $= Al—O—CO—CH_3$.

Il est probable que la kaolinite donne lieu à un phénomène identique. CLOOS et FRIPIAT (1958) ont étudié cette réaction sur la kaolinite préférentiellement à la montmorillonite, car il est difficile d'évacuer totalement l'eau de cette dernière sans altérer la surface de l'argile. Il est important en effet d'éliminer l'eau d'hydratation pour exclure toute possibilité d'hydrolyse.

1. — *Expériences*

L'échantillon de kaolinite déshydratée (sous vide pendant 24 h à 140°C) est traité par l'acide acétique ou le chlorure d'acétyle. Le complexe ainsi formé est calciné dans un courant d'oxygène à 550°C après avoir séjourné sous vide à 140°C. Une nouvelle acétylation est effectuée sur l'échantillon calciné pour étudier l'effet de la déshydroxylation.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

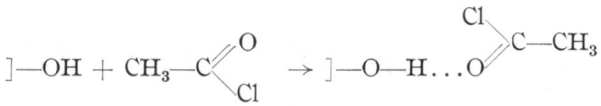
	Échantillon n° 1	Échantillon n° 2
Surface spécifique de la kaolinite de départ en m^2/g	15,5	42,0
Surface spécifique de la kaolinite après calcination à 550°C (en m^2/g)	—	46,2
BEC de la kaolinite de départ (µeq/g)	50	95
BEC de la kaolinite après calcination à 550°C (µeq/g)	—	60
Fixation d'acétyles par traitement au chlorure d'acétyle (en µeq/g)		
— kaolinite de départ	165,5	414,0
— kaolinite après calcination	44,5	115,0
Fixation d'acétyles par traitement à l'acide acétique (en µeq/g)		
— kaolinite de départ	—	393
— kaolinite après calcination	—	385
Surface occupée par un acétyle après traitement (Å²)		
— au chlorure d'acétyle	15,53	16,83
— à l'acide acétique	—	17,72

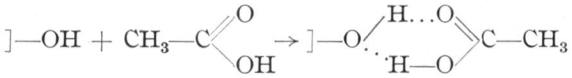
(d'après CLOOS et FRIPAT).

2. — *Interprétation*

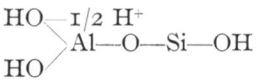
D'après les auteurs, il apparaît que la fixation physique ne peut pas être la cause de la fixation, étant donné l'énergie mise en œuvre quand les complexes sont chauffés sous vide. Ce taux de fixation est également incompatible avec l'encombrement des molécules et la diminution du taux de fixation du chlorure d'acétyle après calcination, bien que la surface argileuse ait augmenté. Trois hypothèses sont avancées pour expliquer la nature de l'interaction entre l'argile et l'agent d'acétylation.

— Formation d'un pont hydrogène entre les groupes carbonyle et les hydroxyles de surface :

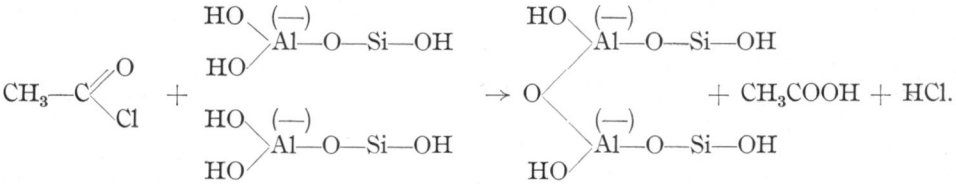


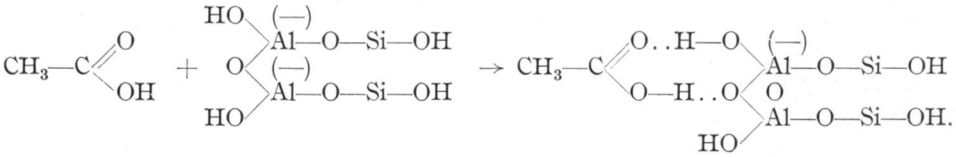


— Intervention de chaînons du type :



où l'atome d'aluminium agirait comme un acide de Lewis (voir 1re partie) :

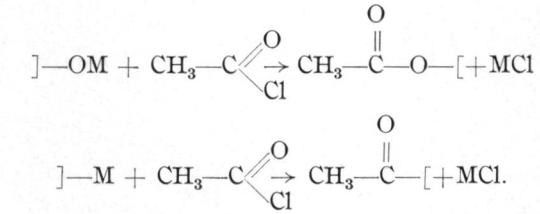




Des réactions semblables pourraient se produire avec Si—OH. On voit alors pourquoi il existe une analogie entre les deux agents d'acétylation.

— Formation de liens covalents.

Il peut y avoir estérification de l'argile ; celle-ci pouvant se produire également aux sites d'échanges cationiques (M) :



Les taux de fixation du chlorure d'acétyle peuvent donc être voisins de la capacité d'échange après calcination. Il reste toujours, cependant, des possibilités de ponts hydrogène avec l'acide acétique, d'où les valeurs voisines avant et après calcination.

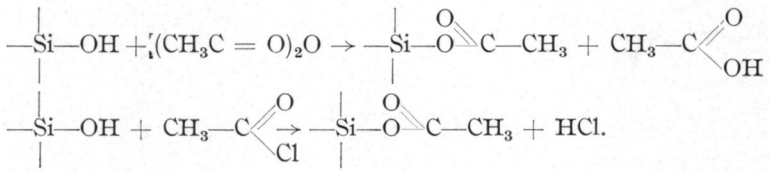
En conclusion, il se produit bien une réaction entre le chlorure d'acétyle, l'acide acétique et la kaolinite. Notons que l'examen des spectres infrarouge faits sur des alumino-silicates (UYTTERHOEVEN, FRIPIAT et DOCKX, 1959) montre l'absence de radicaux COOH non ionisés ; ceci prouve l'existence de liens acétates.

Remarque : Les ponts hydrogènes invoqués dans la première hypothèse se rapproche beaucoup des liaisons que nous avons envisagées précédemment.

B. — RÉACTIONS AVEC LA MONTMORILLONITE

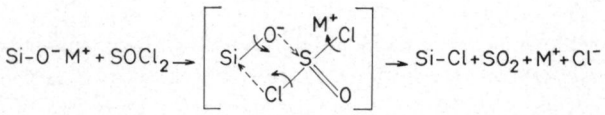
SPENCER et GIESEKING (1952), SLABAUGH (1952) et DEUEL (1951, 1952) ont effectué la synthèse d'un certain nombre de complexes.

La montmorillonite est, elle aussi, susceptible de subir une acétylation :



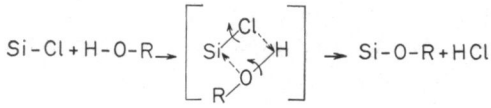
DEUEL a préparé d'autres dérivés :

— Action du chlorure de thionyle sur la montmorillonite-Na :

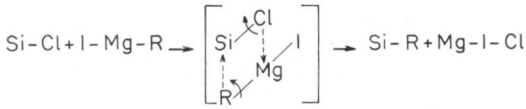


Avec l'eau, la montmorillonite chlorée donne de la montmorillonite protonique et de l'acide chlorhydrique.

— Action du méthanol et de l'éthanol sur la montmorillonite chlorée :



— Action de l'iodure d'éthylmagnésium.



— Obtention de dérivés phénylés par la réaction de FRIEDELCRAFT.

La montmorillonite peut donc participer à diverses réactions. Les taux de substitution sont variables suivant la nature du réactif utilisé. Le tableau suivant en donne certaines valeurs, de même que la capacité d'échange des produits obtenus.

Complexes	Capacité d'échange de bases en meq/100 g	Degrés de substitution en meq/100 g	
		(1)	(2)
Montmorillonite Na.....	110	—	—
Montmorillonite Cl	—	—	82,0
	34,5	75,5	75,5
Méthoxy-montmorillonite	52,1	57,9	57,8
	27,6	82,4	82,3
Éthoxy-montmorillonite	57,0	53,0	52,9
Éthyl-montmorillonite	34,4	75,6	75,1
	28,0	82,0	108,1
Phényl-montmorillonite.....	28,0	82,0	243,1

(D'après DEUEL)

(1) : Degré de substitution d'après la capacité d'échange de la montmorillonite-Na.

(2) : Degré de substitution calculé d'après les dosages du carbone ou du chlore.

Toutes ces réactions tendent à montrer la réactivité des groupes (OH) de la surface. C'est ce que semblent prouver les spectres infrarouge obtenus par DEUEL sur la phényl-montmorillonite.

Cependant, si des spectres montrent effectivement une diminution de la bande d'absorption des (OH), comme on pouvait s'y attendre s'ils entrent en réaction,

ils ne font pas apparaître l'existence d'esters de phényle (bande caractéristique vers 1 200 cm^{-1}).

Enfin, comme pour les autres complexes, les radicaux organiques fixés se trouvent entre les feuillets. Il en résulte des modifications des valeurs de *d* o o *l* (SPENCER, 1952) :

	d o o *l* ;
Montmorillonite + anhydride acétique	12,77 Å ;
Montmorillonite + chlorure d'acétyle	13,4 Å ;
Montmorillonite + Phényle	14,84 Å.

Les cations échangeables jouent aussi un rôle, bien qu'il soit peu apparent dans les hypothèses précédentes. SLABAUGH (1952) a constaté que la quantité de groupements benzoïdes fixés varie suivant l'ordre :

$$Li < K < Rb < Cs < Na < M^{2+} < M^{3+}$$

Remarquons, là encore, le classement des cations, tout à fait identique à celui que nous avons noté (chap. II).

C. — CONCLUSION

Les groupes (OH) superficiels seraient donc très réactifs. Si la présence de tels groupes est acquise pour la kaolinite, elle ne l'est pas pour la montmorillonite. Peut-être l'hypothèse de MACCONNELL permettrait-elle d'expliquer les phénomènes. De plus, ces considérations amènent des auteurs comme DEUEL à attribuer une grande partie de la capacité d'échange aux groupes Si-OH dissociés. L'étude de ces complexes peut donc amener à reconsidérer la nature de la surface des feuillets.

Notons toutefois, que tous les complexes préparés subissent un chauffage parfois assez important. Étant donné les propriétés catalytiques de la surface de l'argile, on peut se demander si les corps adsorbés restent les mêmes après chauffage.

II — Inexistence des réactions chimiques

GREENLAND et RUSSEL (1955) pensent que l'action du chlorure de thionyle se fait de la façon suivante :

$$\text{Argile}\left.\begin{matrix}-\\-\\-\\-\end{matrix}\right|\begin{matrix}Na^+\\Na^+\\Na^+\\Na^+\end{matrix} + \begin{matrix}H_2O\\SOCl_2\end{matrix} \rightarrow \left.\begin{matrix}-\\-\\-\\-\end{matrix}\right|\begin{matrix}Na^+\ H^+\\Na^+\ SO_2\\Na^+\ H^+\end{matrix}\ \begin{matrix}Cl^-\\Cl^-\end{matrix} \rightarrow \left.\begin{matrix}-\\-\\-\\-\end{matrix}\right|\begin{matrix}H^+\ NaCl\\Na^+ + SO_2\\H^+\ NaCl.\end{matrix}$$

Il y aurait formation de chlorure sur la surface de l'argile. De plus, le chlorure de thionyle pourrait s'adsorber car des lavages au benzène et au dioxane réduisent la fixation.

La formation de chlorure en surface est prouvée par :

— Les quantités de Cl^- sur la surface, qui sont plus grandes avec les cations qu'avec l'argile H.

— Les diagrammes de diffraction des rayons X qui montrent nettement l'existence de chlorure de sodium cristallisé.

Ces auteurs et GLAESER (1954) indiquent, d'autre part, que le chlorure d'acétyle est hydrolysé au contact des feuillets de la montmorillonite, et qu'il y a fixation d'acide acétique. Les courbes de désorption des complexes obtenus à partir de l'argile traitée par l'acide acétique et le chlorure d'acétyle sont les mêmes (fig. 20).

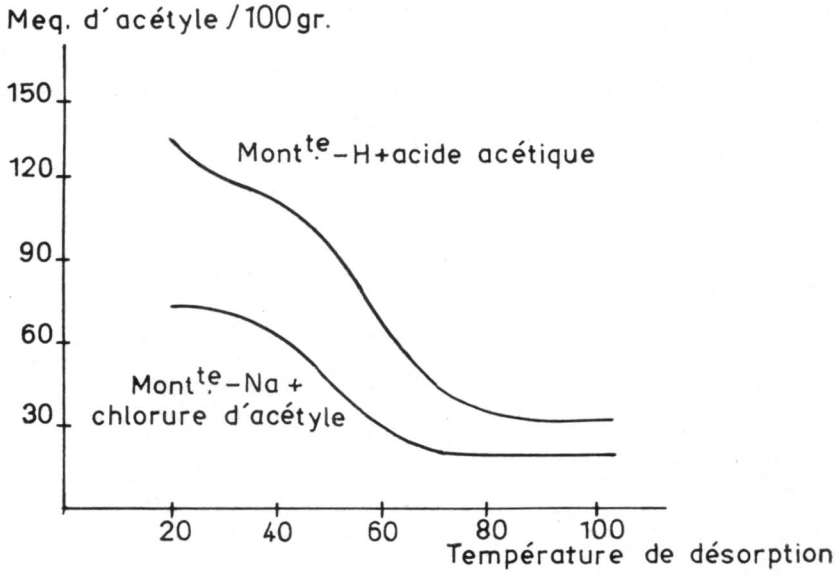


FIG. 20. — *Comportement des complexes Montmorillonite*-H + *acide acétique, Montmorillonite*-Na + *chlorure d'acétyle, lors du chauffage à différentes températures* (GLAESER, 1954)

Ces courbes montrent que des radicaux acétyles sont fortement retenus puisqu'ils ne s'éliminent pas, même par un chauffage prononcé. Se basant sur la contraction de l'épaisseur de la molécule (de 1 Å environ), ces auteurs supposent que :

— des liaisons hydrogènes peuvent intervenir.

— les radiaux CH_3 peuvent pénétrer dans les cavités hexagonales de la surface de l'argile.

— des associations avec les cations échangeables interviennent.

— qu'il se forme peut-être des ions carbonium $\left[CH_3—C\begin{matrix}OH\\OH\end{matrix}\right]^{+}$ avec les argiles H.

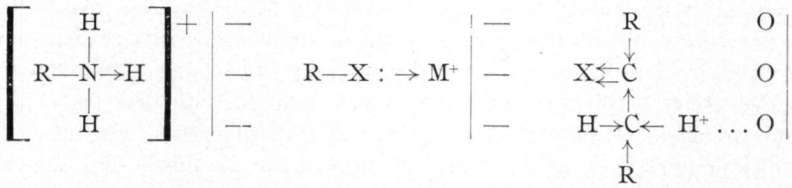
— qu'un arrangement spécifique des molécules est adopté. SLABAUGH pense, en particulier, que les molécules se lieraient aux feuillets au cours de la désorption, comme les molécules d'eau dans l'halloysite (voir 1re partie).

Évidemment, selon cette thèse, les groupes Si—OH ne sont pas l'origine des charges négatives du feuillet. De plus leur réactivité est mise en doute.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Un grand nombre de molécules sont donc capables de se fixer sur la surface des particules argileuses. Bien sûr, la montmorillonite n'est pas la seule à former des complexes. WALKER a décrit des associations entre la vermiculite et des molécules ionisées ou non. De même, la kaolinite, l'Illite, les chlorites et l'attapulgite fixent aussi des substances organiques, mais en faibles quantités généralement.

L'étude des mécanismes amène à penser que la mobilité des électrons dans une molécule est essentiellement l'origine de l'adsorption. En effet, qu'il s'agisse de la fixation sous forme ionique ou sous forme de molécules neutres par des liaisons avec les cations ou avec la surface, le même processus est impliqué ; un atome de la molécule doit pouvoir céder un ou deux électrons. Le schéma suivant résume les faits :



adsorption sous forme ionique — fixation des molécules neutres — établissement d'une liaison C—H. . . O

Quant aux réactions chimiques avec la surface, il semble qu'il soit possible de les rattacher à un ou plusieurs des mécanismes précédents, car elles ne se caractérisent pas nettement.

Il est très intéressant de noter les propriétés catalytiques de la surface de l'argile qui se comporte principalement comme un catalyseur d'hydrogénation, ainsi que le rôle essentiel de l'eau.

TROISIÈME PARTIE

LA STRUCTURE DES COMPLEXES ORGANIQUES

Les molécules pénètrent donc entre les feuillets de la montmorillonite, de la vermiculite ou de l'halloysite.

Leur orientation dépend de plusieurs facteurs. Elle dépend, en premier lieu, de la forme, des dimensions des molécules. La nature des substituants pourra expliquer certaines modifications dans la structure des complexes. Les interactions entre les molécules et les feuillets conditionnent aussi leur position, suivant qu'il s'agit de molécules ionisées, ou de molécules neutres. D'autres facteurs, tels que les cations échangeables peuvent, eux aussi, intervenir dans la mesure où ils sont associés aux radicaux organiques.

L'arrangement des molécules obéit évidemment au principe général de l'état stable. L'énergie du système doit être minimum. Les molécules vont donc se disposer de telle sorte que le complexe n'ait plus aucune tendance à évoluer. De plus, HENDRICKS, a observé que les corps organiques s'orientaient de façon que l'écartement des feuillets soit minimum. On peut donc penser que les substances adsorbées seront dans un état différent de l'état libre.

Dans un but de simplification, nous étudierons les molécules aliphatiques et les molécules cycliques séparément.

I — Les distances interatomiques et la configuration moléculaire

Il n'est pas surprenant que des molécules situées entre les feuillets des argiles voient leur configuration modifiée. En effet, elles sont soumises à différentes forces :

— forces d'attraction entre feuillets qui exercent une compression.

— forces de liaison entre elles et les feuillets qui tendent à les déformer plus ou moins.

Il en résulte que les distances séparant les atomes sont elles aussi modifiées. Notons toutefois, que les renseignements sur ces distances sont obtenus à partir de diagrammes de diffraction de rayons X, comparativement aux dimensions calculées en prenant les valeurs des rayons de VAN DER WALLS. Dès lors, il ne faut pas perdre de vue que les chiffres avancés sont toujours entachés d'une certaine erreur. Leur considération est néanmoins très utile.

Nous avons déjà signalé que l'organisation en couches moléculaires était très poussée. MACEWAN a nettement mis ce fait en évidence en établissant les courbes

de densité électronique pour les complexes avec le nitrométhane et l'acétonitrile (fig. 21).

Il est logique de penser que la configuration moléculaire sera influencée par le nombre de couches. C'est effectivement ce qui se produit.

Pour les complexes à une couche, on peut admettre que le plan des atomes de carbone, si celui-ci est parallèle aux feuillets, est équidistant de ceux-ci. Dès lors, il est aisé de calculer les distances les séparant des atomes d'oxygène ou des groupes (OH) superficiels. Par contre, cela semble plus discutable pour l'halloysite. Cependant, les valeurs trouvées pour cette argile permettent d'interpréter correctement les résultats obtenus avec la montmorillonite. Ces considérations peuvent donc s'appliquer à l'halloysite.

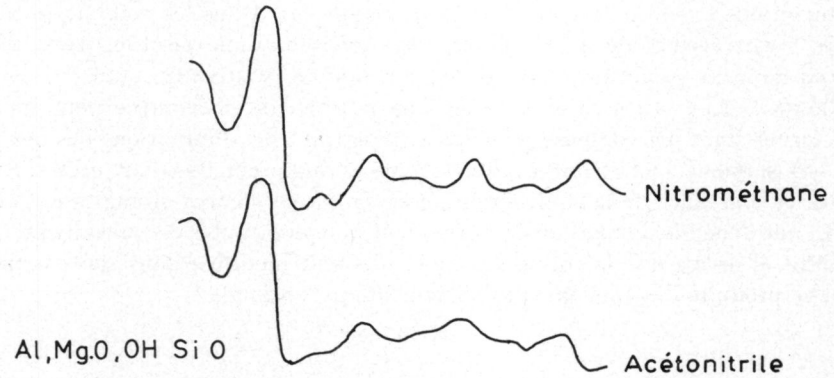


FIG. 21. — *Variations de la densité électronique le long de l'axe* c *dans les complexes de la montmorillonite avec le nitrométhane et l'acétonitrile* (MACEWAN, 1948)

Nous avons vu qu'il pouvait s'établir des liaisons C—H...O. La mesure de la contraction de la distance C—H—O peut fournir des indications sur leur importance.

Distances C—H—O dans les complexes de l'halloysite :

Molécules	(Distances Å)
Nitrométhane	3,05
Méthanol	3,1
Acétonitrile	3,1
Acétaldéhyde	3,2
Éhylèneglycol	3,25
Acétone	3,35
1-3 propanediol	3,6
Éthanediamine	3,65
Nitrobenzène (Mont^te^)	2,4
C—H—O Van der WALLS	3,7-3,8

(D'après Mac. EWAN)

Ce tableau montre que la contraction augmente au fur et à mesure que la fonction organique a un effet inducteur plus grand.

Nous avons déjà signalé que ces contractions étaient dues, selon certains auteurs, à des liaisons C—H...O. BRINDLEY, REINHARD et HOFFMANN (1962) les attribuent plutôt à des arrangements particuliers des molécules organiques sur la surface des feuillets. Ils s'appuient sur le fait, vérifié pour la 2-5-8 nonanetrione, que les fréquences de vibration de valence C—H ne sont pas modifiées quand le composé est adsorbé. De plus, ces arrangements géométriques favoriseraient les interactions entre les molécules organiques. Ces deux hypothèses sont réunies dans une idée émise par EMMERSON : dans le cas d'un complexe Montmorillonite-méthanol, la valeur de l'espacement interfeuillet peut s'expliquer en considérant l'orientation des orbitales de liaison des atomes d'oxygène de la surface de l'argile.

Dans les complexes à deux couches, de telles liaisons peuvent aussi exister mais les interactions entre molécules doivent se manifester. Dans les complexes à trois couches, les molécules de la couche centrale sont dans une position particulière : elles sont dans des conditions voisines de l'état liquide (MACEWAN, 1949).

GREEN-KELLY (1955 *a*) observe également le même phénomène pour les complexes formés avec des composés cycliques. Cependant, les diminutions des distances C—H—O seraient moins importantes que ne le supposent BRADLEY et MACEWAN. De plus, la constance de la contraction observée pour les corps aromatiques, amène à penser que l'énergie de fixation doit être identique pour toutes ces substances.

Enfin, il arrive que la forme des molécules soit modifiée dans son ensemble. Il peut se produire des torsions, des plissements par exemple.

II — Les structures

A. — STRUCTURE DES COMPLEXES FORMÉS A PARTIR DES MOLÉCULES ALIPHATIQUES

Les molécules aliphatiques peuvent s'orienter de deux façons : soit parallèlement aux feuillets, soit perpendiculairement. L'une ou l'autre de ces dispositions est, bien entendu, favorisée ou défavorisée par les interactions dont nous avons parlé. Suivant celles-ci, nous distinguerons le cas où elles sont dues à des ions, et le cas où elles sont dues aux propriétés polaires des molécules.

1. — *Molécules aliphatiques ionisées*

Le système le plus stable sera évidemment formé quand les charges positives des ions neutraliseront le plus exactement les charges négatives des feuillets. Dès lors, on peut s'attendre à ce que les monoamines s'orientent différemment des molécules polyaminées. BRADLEY (1945 *a*), cependant, ne distingue rien qui puisse différencier les monoamines et les polyamines.

a) *Monoamines.*

JORDAN (1949) a étudié l'évolution de la distance *d* o o *l* en fonction du nombre d'atomes de carbone de la molécule. Il nota également le pourcentage de la surface

couverte par les molécules. Notons que les amines sont ajoutées en proportions correspondant à la capacité d'échange de bases. Les variations observées sont données dans le tableau et le graphique suivants (fig. 22).

Nbre d'atomes de C de l'amine	*d* 0 0 *l* (Å)	Intervalle entre feuillets (Å)	Nbre de couches	Surface calculée de l'amine (Å²)	Surface de l'argile couverte
					(%)
0	9,6	0	0	0	0
3	13,5	3,9	1	38	23
4	13,4	3,8	1	44	27
8	13,3	3,7	1	69	42
10	13,6	4	1	81	49
12	17,4	7,8	2	94	57
14	17,4	7,8	2	106	64
16	17,5	7,9	2	119	72
18	17,6	8	2	131	79

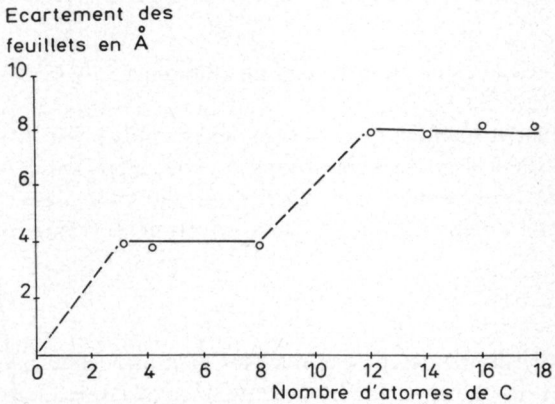


FIG. 22. — *Influence de la longueur des molécules d'amines aliphatiques sur l'écartement des feuillets* (JORDAN, 1949)

Quand plus de 50 p. 100 de la surface interne est couverte, l'espacement interfeuillet double. Il se forme alors une deuxième couche monomoléculaire, en admettant que les plans des atomes de carbone soient parallèles aux feuillets. L'augmentation de 4 Å observée correspond d'ailleurs approximativement au diamètre VAN DER WALLS d'un groupe CH_3. La disposition des molécules pourrait se faire selon le schéma (fig. 23).

Remarque : Ces considérations confirment les observations précédentes selon lesquelles la facilité de fixation des amines augmente avec la longueur de la chaîne.

TALIBUDEEN observe des espacements de 3,7 et 3,1 Å pour les acides aminés. Il attribue également la contraction observée à des liaisons hydrogène et admet l'orientation parallèle des molécules.

Les complexes formés par la montmorillonite —H—Al avec la propylamine et la butylamine en solution saturée apportent de nouveaux éléments (SERVAIS, 1960).

Dans ce cas, l'espacement interlamellaire est de 3,2 à 3,3 KX, et la position perpendiculaire semble favorisée par le fait que les charges des feuillets sont neutralisées par des molécules différentes. En conséquence, l'espace interfeuillet serait plus relâché. D'autre part, cette orientation n'entraîne pas de possibilité d'interactions entre les groupes —NH_3^+ et la surface de l'argile, ce qui est vérifié par spectro-

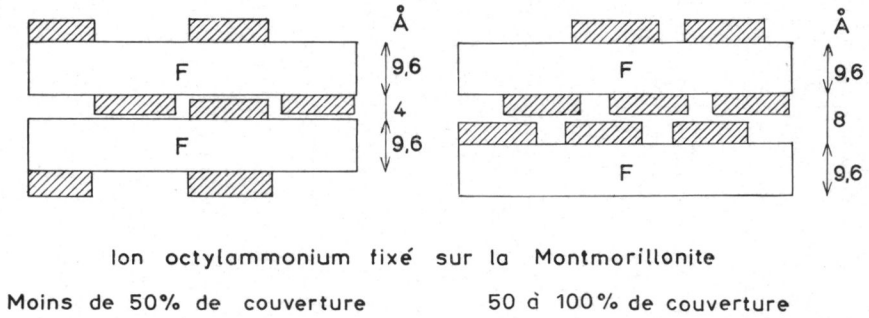


FIG. 23. — *Positions des molécules d'amines entre les feuillets de la montmorillonite* (JORDAN, 1949)

graphie infrarouge. Celle-ci ne montre pas de différences avec les spectres du chlorhydrate pur.

Il faut remarquer, toutefois, que les complexes étudiés par JORDAN et SERVAIS ne sont pas obtenus dans les mêmes conditions. La concentration de surface en amines dans les derniers est certainement plus élevée que dans les premiers. Il n'est alors pas exclu que cette augmentation de concentration entraîne une modification de l'orientation.

b) *Polyamines.*

Des données précises n'existent que pour les diamines (SERVAIS, 1960). Celles-ci, en association avec la montmorillonite, en quantités équivalentes à la capacité d'échange, donnent des complexes où l'espacement est de 2,6 KX. De plus, les spectres infra-rouge montrent l'existence d'une interaction entre —NH_3^+ et la surface

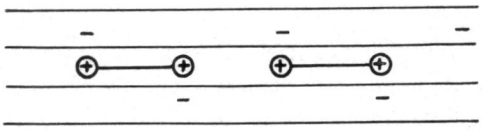


FIG. 24. — *Orientation des diamines entre les feuillets de la montmorillonite* (SERVAIS, 1960)

de l'argile. Ces deux faits conduisent à supposer que les molécules ont une orientation parallèle. Cette position est la plus stable du point de vue énergétique, tout au moins pour les diamines utilisées (éthylènediamine, propylènediamine). En effet, il existe une grande différence entre la longueur de la chaîne carbonée et la distance moyenne de deux sites négatifs. Il en résulte que chaque cation alkyldiammonium ne peut pas saturer deux sites du même feuillet, mais qu'il peut au contraire, en neutraliser deux de deux feuillets adjacents. A ce moment, ceux-ci doivent subir une translation

l'un par rapport à l'autre, translation qui amène la charge négative de l'un au milieu de deux charges négatives de l'autre (fig. 24).

Cette position est énergétiquement stable.

Des solutions saturées en diamines donnent des complexes, dont l'examen aux rayons X et par spectrographie infrarouge indiquent une orientation perpendiculaire des molécules. Nous retrouvons ici le même phénomène dû à l'augmentation de la concentration des molécules sur la surface de l'argile.

2. — *Les molécules neutres*

La concentration et la longueur de la chaîne carbonée interviennent également. La concentration se manifeste quand les complexes sont préparés à partir d'amines pures, car dans ces conditions, les molécules ne sont pas dispersées dans un solvant. D'autre part, on peut penser que les amines ne sont pas ionisées.

ARAGON, CANO-RUIZ et MACEWAN (1959) observent, pour des amines, que l'espacement interlamellaire augmente régulièrement avec la longueur de la chaîne carbonée (fig. 25).

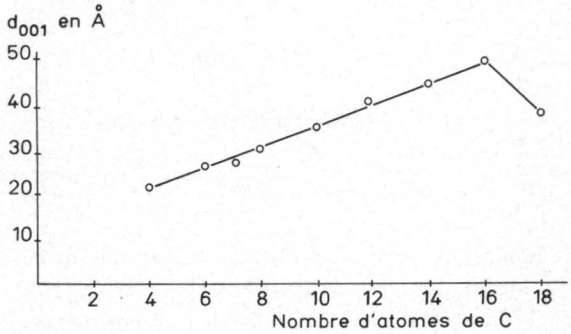


FIG. 25. — *Influence de la longueur des molécules d'amines aliphatiques neutres sur la distance d o o l* (ARAGON *et* al., 1959).

La pente de la droite est approximativement de 2,6 Å par atome de carbone, ceci correspond à peu près, à la longueur projetée de la liaison C—C. Les molécules ont donc une orientation perpendiculaire. Cependant, les valeurs trouvées de *d* o o *l* ne correspondent pas exactement à leurs longueurs. Il faut donc supposer :

— que les molécules se recouvrent partiellement.

— que deux ou trois atomes de carbone sont en contact avec le feuillet, ce qui impose à la molécule d'être tordue.

Les auteurs pensent que cette dernière possibilité est la plus probable.

Pour une très longue chaîne, les molécules s'inclineraient, d'où la diminution de *d* o o *l* observée quand le nombre d'atomes de carbone est 18.

Les corps oxygènés (alcools, éthers, cétones) s'orienteraient parallèlement aux feuillets de façon à prendre la configuration la plus plane (BRADLEY, 1945 *a*, MACEWAN, 1948). MACEWAN note que l'espacement peut varier s'il existe des chaînes latérales. Cependant, cette disposition ne serait pas générale. BRINDLEY a montré par l'étude

des densités électroniques que le glycol se disposait de façon que le plan des atomes de carbone soit perpendiculaire au feuillet. Le complexe possède deux couches (fig. 26).

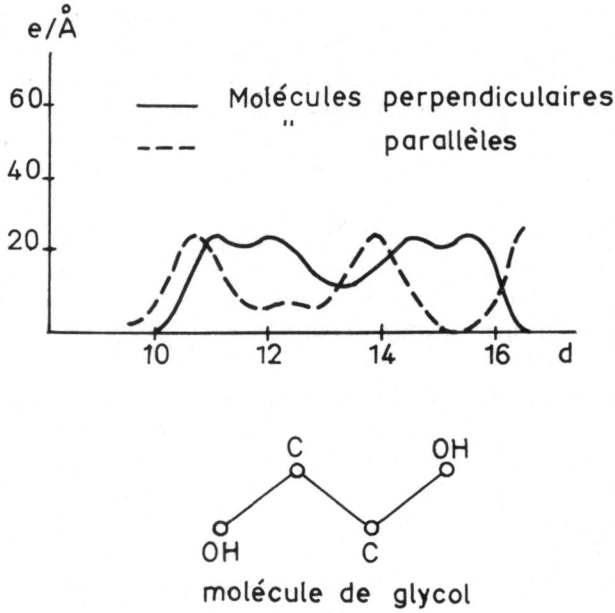


FIG. 26. — *Variations de la densité électronique le long de l'axe* c *dans le complexe montmorillonite-glycol* (BRINDLEY *in* MACEWAN, 1948)

Le graphique montre, en effet, que si le plan des atomes de carbone était parallèle aux feuillets il n'y aurait plus que deux pics au lieu de quatre.

D'autre part, l'orientation des monoalcools devient perpendiculaire quand la chaîne est longue et que le complexe peut se former (BARSHAD, 1952) (fig. 27).

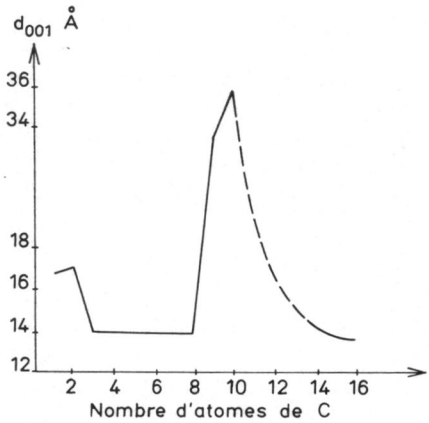


FIG. 27. — *Influence de la longueur des molécules d'alcools sur la distance* d_{00l} (BARSHAD, 1952)

L'orientation serait parallèle jusqu'à 8 atomes de carbone.

Remarque : La disposition parallèle permet la formation d'un plus grand nombre de liaisons C—H...O. Elle doit donc correspondre à une plus grande stabilité du complexe.

B. — Structure des complexes formés a partir de molécules cycliques

Nous étudierons séparément les molécules dont le ou les cycles possèdent six atomes, puis celles dont le cycle n'a que cinq atomes.

1. — *Cycles à six atomes*

Le cycle peut s'orienter soit parallèlement, soit perpendiculairement aux feuillets. Ces deux orientations correspondent à deux classes d'espacements interlamellaires (Green-Kelly, 1956 *a*) :

— orientation parallèle : $12{,}5 < d\,0\,0\,l < 14{,}5$ Å :
— orientation perpendiculaire $d\,0\,0\,l \geqslant 14{,}6$ Å.

Certaines molécules complexes ne peuvent adopter que la première disposition ; c'est le cas de l'α-méthyl-pipéridine. Cette configuration, pour les molécules plus simples, ne semble exister qu'aux faibles concentrations ; Ex. : paraphénylènediamine (Hendricks — réf. in Grim 1953 *b*). Aux fortes concentrations les molécules se réorientent et se disposent perpendiculairement. C'est ainsi que le nitrobenzène en solution saturée donne un $d\,0\,0\,l$ de 15,2 Å, et qu'après évaporation il donne un $d\,0\,0\,l$ de 12,5 Å. Il en est de même de la pyridine.

a) *Cycle parallèle aux feuillets.*

Exemples de composés prenant cette position (Greene-Kelly, 1956 *a*) ;
Hydrochlorure de pipéridine avec $d\,0\,0\,l = 15{,}3$ KX ;
Hydrochlorure d'α-méthyl-pipéridine $d\,0\,0\,l = 13{,}5$ KX ;
Hydrochlorure de méthyl-cyclohexanone $d\,0\,0\,l = 13{,}6$ KX.

La distance basale donnée par la pipéridine est voisine de celle donnée par l'amine à chaîne droite correspondante. Si on admet que pour cette dernière, les atomes de carbone sont dans un même plan, on peut dire qu'il en est de même pour la pipéridine (Greene-Kelly, 1956 *b*). Ceci ne peut évidemment se produire que s'il y a une modification des angles de valence, puisque la molécule non contrainte a une forme plissée (cycle saturé). D'autre part, les dérivés monosubstitués de la pipéridine donnent les mêmes valeurs de $d\,0\,0\,l$. Ceci ne peut se comprendre que si la molécule est plissée. Dès lors il devient difficile de concilier ce point de vue avec le fait que le plan des atomes de carbone se trouve orienté parallèlement aux feuillets. Pourtant, comme un certain nombre d'observations appuient cette idée, tout au moins pour quelques molécules, il faut admettre l'intervention d'un autre phénomène. Il pourrait se produire, par exemple, une rotation, ou une oscillation de la chaîne autour d'une simple liaison. De plus, il faut aussi dire que la position des groupements fonctionnels peut être restreinte dans l'espace interlamellaire. Rappelons à ce sujet la configuration du glycol décrite par Brindley.

Quand des chaînes latérales sont sur le cycle, il y a augmentation de la valeur de *d* o o *l* (Ex. : hexylpyridine).

L'espacement interlamellaire diminue quand le complexe est formé avec de petites molécules. Certains expliquent cela en admettant que les groupes méthyle pourraient pénétrer dans les cavités hexagonales du feuillet. En fait, pour GREENE-KELLY, cette raison ne semble pas valable, car la diffusion dans les complexes à petites molécules n'est pas différente de celle des complexes à molécules plus grosses.

b) *Cycle perpendiculaire aux feuillets.*

Aux fortes concentrations se produit un réarrangement des molécules et l'orientation perpendiculaire apparaît. GREENE-KELLY (1955 *a*) a établi les courbes de densité électronique pour différentes substances : Benzidine, nitrobenzène, pyridine (fig. 28). A côté des graphiques, sont représentées les positions des molécules entre les feuillets.

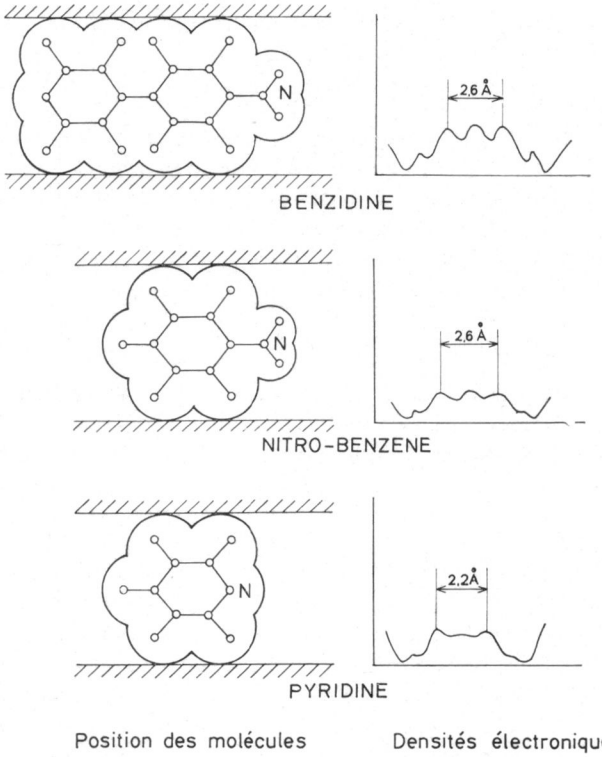
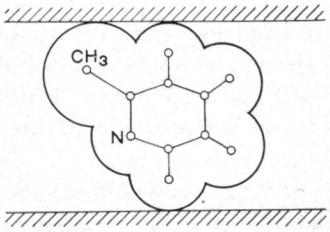


FIG. 28. — *Variations de la densité électronique le long de l'axe* c *dans les complexes de la montmorillonite avec la benzidine, le nitrobenzène et la pyridine. Orientation des molécules entre les feuillets* (GREENE-KELLY, 1955 *a*).

La présence de groupes méthyle fournit des indications supplémentaires. La substitution en α (α méthyl-pyridine) donne un *d* o o *l* supérieur de 0,9 Å par rapport à la pyridine. La substitution en γ ne donne qu'une différence de 0,2 Å. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'atome d'azote est repoussé par les feuillets et le groupe

méthyle CH_3 attiré, dans le dérivé α, alors que dans le dérivé γ, l'atome d'azote et le groupe CH_3 sont équidistants des feuillets (fig. 29).



α METHYL-PYRIDINE

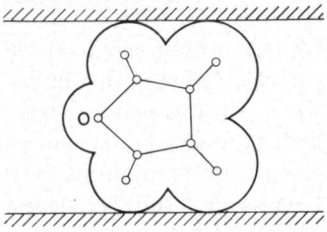
FIG. 29. — *Position de la molécule d'α-méthyl-pyridine entre les feuillets de la montmorillonite* (GREENE-KELLY, 1955 *a*).

La disposition perpendiculaire de la benzidine est en contradiction avec les résultats de HAXAIRE qui, nous l'avons vu, lui attribuait une orientation parallèle.

Les composés polycyliques se comporteraient de la même façon que les composés cycliques (GREENE-KELLY, 1955 *a*).

2. — *Cycles à cinq atomes*

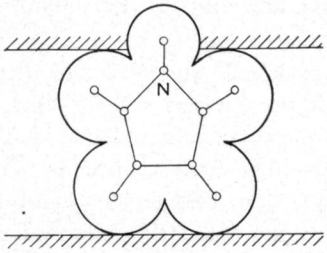
Dans les complexes formés à partir du thiophène et du furanne, l'orientation est perpendiculaire. Ceci s'explique par l'action répulsive des deux feuillets de l'argile sur les atomes d'oxygène et de soufre (fig. 30).



FURANNE

FIG. 30. — *Position de la molécule de furanne entre les feuillets de la montmorillonite* (GRENNE-KELLY, 1955 *a*).

Le noyau pyrrole pose un problème plus délicat. La valeur de *d* o o *l* est 14,3 Å. Elle est trop faible pour une configuration perpendiculaire comme le furanne, et trop forte pour une configuration plane. Pour GREENE-KELLY la position est bien perpendiculaire, mais il doit s'établir une liaison N—H...O qui réduit ainsi la distance N—H—O (fig. 31).



PYRROLE

FIG. 31. — *Position du noyau pyrrole entre les feuillets de la montmorillonite* (GREENE-KELLY, 1955 *a*).

C. — Structure des complexes a grosses molécules

Le seul exemple, assez étudié, que nous connaissons est celui des protéines (Talibudeen, 1955). L'adsorption des polypeptides donne des espacements de 5,6 et 9,2 Å que Talibudeen attribue à une et deux couches. La réduction de l'épaisseur dans le complexe à deux couches peut s'expliquer par un entassement particulier des molécules comme l'indique la fig. 32.

Les protéines globulaires et la gélatine donnent des résultats semblables. Cela signifierait qu'elles sont dénaturées à l'état de chaînes polypeptidiques du type β-kératine, comme nous l'avions précédemment signalé.

Dans ce cas, il faut supposer que :

— les groupes C = O et N = H de cette chaîne sont coplanaires.

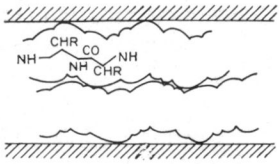


Fig. 32. — *Position des chaines polypeptidiques entre les feuillets de la montmorillonite* (Talibudeen, 1955)

— la valeur plus petite de 3,4 Å observée pour un simple résidu aminoacide, comparée à la valeur de 3,63 Å calculée pour la configuration coplanaire, est due à une rotation des liaisons C—C et C—N par rapport au plan des groupes C = O et N—H.

— dans chaque groupe de deux résidus aminoacides les deux CH_2 ou C—HR sont déplacés dans la direction opposée par rapport au plan des C = O et N—H.

Avec ces suppositions, l'épaisseur d'une chaîne est de 5,5 Å et celle de deux chaînes légèrement interpénétrées, de 10 Å. Ces valeurs sont voisines de celles observées expérimentalement.

Notons qu'il est difficile de déterminer la position de tous les radicaux de tels édifices atomiques. Toutefois, il semble que la molécule de protéine, ou seulement la chaîne polypeptidique, doivent subir de sévères contraintes.

III — Nature des couches moléculaires adsorbées

Plusieurs fois, nous avons signalé que la nature, ou plutôt l'état des substances adsorbées devait être modifié par rapport à l'état libre. En effet, nous savons que des liaisons existent entre les molécules. Par ailleurs, l'existence de liens entre celles-ci et les feuillets change probablement leurs propriétés.

D'après MacEwan (1948, 1949), les molécules adsorbées seraient douées d'une grande mobilité dans un plan parallèle aux feuillets. La distribution des molécules dans une couche ne serait donc pas constante, et il s'agirait en somme d'un liquide à deux dimensions. Cependant, nous devons bien constater que cette conception

ne peut être considérée qu'avec grande prudence. Il est en effet difficile d'admettre l'existence de liaisons, et de ce liquide bidimensionnel. Il faut donc penser que le complexe présente la propriété de passer par plusieurs stades, selon les conditions physiques auxquelles il est soumis (forces d'attraction entre les feuillets, concentration de surface, hydratation).

Dès lors, la mobilité des molécules pourrait exister quand l'espace interlamellaire est assez lâche, par suite d'une forte hydratation, ou d'un liquide à constante diélectrique élevée, par exemple. Puis, ces conditions se modifiant, la couche moléculaire deviendrait plus organisée.

Une expérience est intéressante à ce sujet (SERVAIS, 1960). La désorption des amines fixées sur la montmorillonite par l'alcoolate de sodium provoque un phénomène différent, selon qu'il s'agit de mono ou de diamines. Les premières sont complètement éliminées, alors que les secondes ne le sont que partiellement. L'alcoolate ne pénètre entre les feuillets que lorsque les monoamines sont déplacées ; il y pénètre quand des diamines sont encore fixées. Il en résulte que les molécules d'alcoolate sont beaucoup plus tassées dans le premier cas puisqu'elles doivent s'insérer entre des feuillets fortement rapprochés (Mon^{te}-Na). Les spectres infrarouges révèlent des caractéristiques correspondant à l'état solide. Dans le deuxième cas, les spectres montrent des caractères faisant penser à l'état gazeux.

Cet aspect des complexes organiques des argiles est très intéressant car il présente peut-être un moyen d'aborder de plus près les problèmes concernant les liaisons intermoléculaires.

IV — Conclusion

Qu'elles soient aliphatiques ou cycliques, les molécules peuvent se disposer parallèlement ou perpendiculairement aux feuillets. L'orientation dépend de la complexité de l'édifice atomique et parfois des facteurs stériques imposent une configuration précise. Soulignons l'importance de la concentration de surface, qui peut être tenue pour responsable d'un certain nombre d'observations. D'autres facteurs physiques interviennent également ainsi que l'origine même du complexe.

QUATRIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS DES COMPLEXES ORGANIQUES DES ARGILES

I — Propriétés des complexes organiques des argiles

Deux propriétés essentielles caractérisent ces complexes :

— la réduction de la capacité d'échange de bases.
— les caractères organophiles des particules argileuses complexées.

A. — Altération des propriétés d'échange

Que l'on prenne les groupes Si—OH ou les substitutions isomorphiques pour origine de la BEC, la réduction de celle-ci peut toujours s'expliquer. En effet, il suffit de considérer la formation de complexes par réaction chimique, ou par échange d'ions. Dans ce dernier cas, les grosses molécules organiques fixées (protéines) par exemple, ne peuvent plus être déplacées par les petits ions minéraux (Ensminger, Gieseking, 1941). Il en résulte une diminution de la BEC (fig. 33).

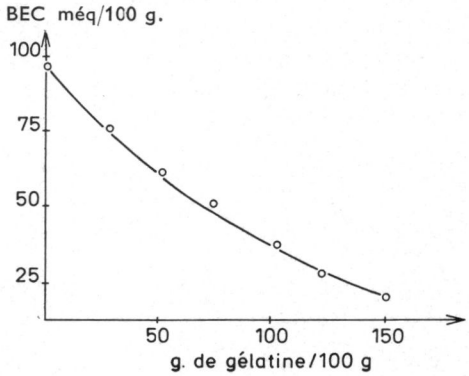


Fig. 33. — *Diminution de la BEC de la montmorillonite par adsorption de gélatine* (Ensminger, Gieseking, 1941)

Cet exemple relatif aux protéines met très nettement ce fait en évidence, et montre aussi la fixation de ces substances par les groupes cationiques (voir 2e partie). L'altération des groupements basiques supprime ce phénomène.

B. — Propriétés organophiles

Par suite de la fixation des molécules organiques, la surface de l'argile devient hydrophobe (Bradley, Greene-Kelly, Jordan).

1. — *Adsorption de l'eau*

Servais (1960) et Hendricks (1941) ont montré que la quantité d'eau adsorbée par les complexes était parfois très diminuée par rapport à celle fixée par l'argile seule. L'analyse thermique différentielle indique, par exemple, qu'avec la phénylène-diamine, il ne se forme pas plus d'une couche monomoléculaire d'eau.

Les caractères hydrophobes augmentent avec la quantité de substance organique au contact de l'argile, ainsi qu'avec les dimensions des molécules (fig. 34).

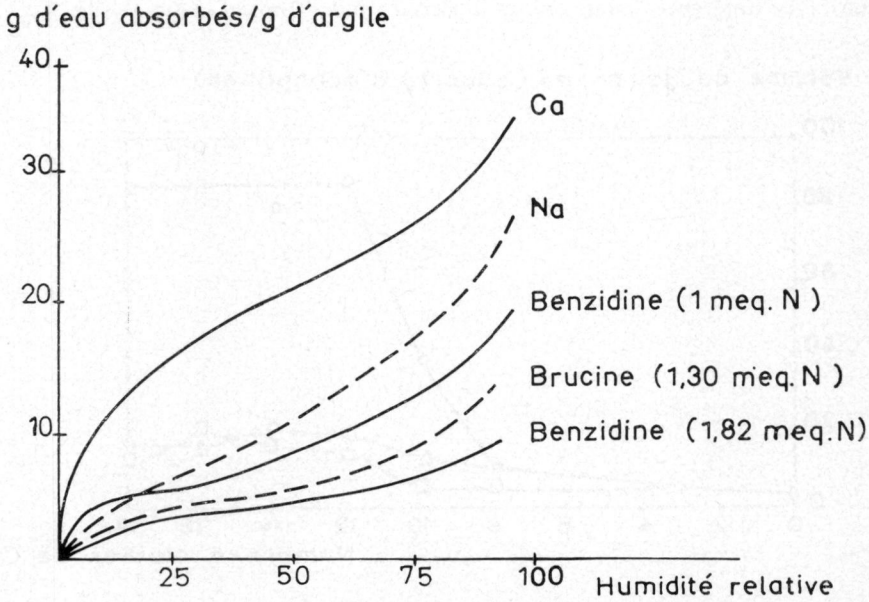


Fig. 34. — *Fixation de l'eau sur des montmorillonites diversement saturées* (Hendricks, 1941)

Ce sont certainement les radicaux CH_2 et CH_3 qui sont à l'origine de cette propriété.

2. — *Gonflement des complexes dans les liquides organiques*

Hauser a découvert que certains complexes organiques de la montmorillonite avaient la propriété de gonfler et de disperser dans les liquides organiques.

MacEwan (1962) distingue deux types de gonflement :

— le gonflement limité ;

— le gonflement complet directement lié au phénomène général des interactions entre les particules colloïdales.

D'après WEISS, le gonflement est inversement proportionnel au nombre de charges par unité de surface.

Il dépend de la nature des molécules adsorbées et de celle du solvant dans lequel est immergé le complexe (GREENE-KELLY, 1956 *b*). Il dépend aussi de la facilité avec laquelle les feuillets peuvent s'écarter pour laisser pénétrer les molécules. Deux facteurs interviendront donc certainement : l'orientation des molécules adsorbées et les propriétés diélectriques du liquide d'immersion.

Exemples (GREENE-KELLY, 1956 *b*) :

Montmorillonite + pipéridine dans l'eau : *d* o o *l* = 13,3 ;
Montmorillonite + pipéridine dans le glycérol : *d* o o *l* = 14,5.

Étant donné que les propriétés hydrophobes augmentent avec la longueur de la chaîne, il en est de même du caractère organophile. Le gonflement des complexes formés avec différentes monoamines illustre ce fait (JORDAN, 1949 *b*) (fig. 35).

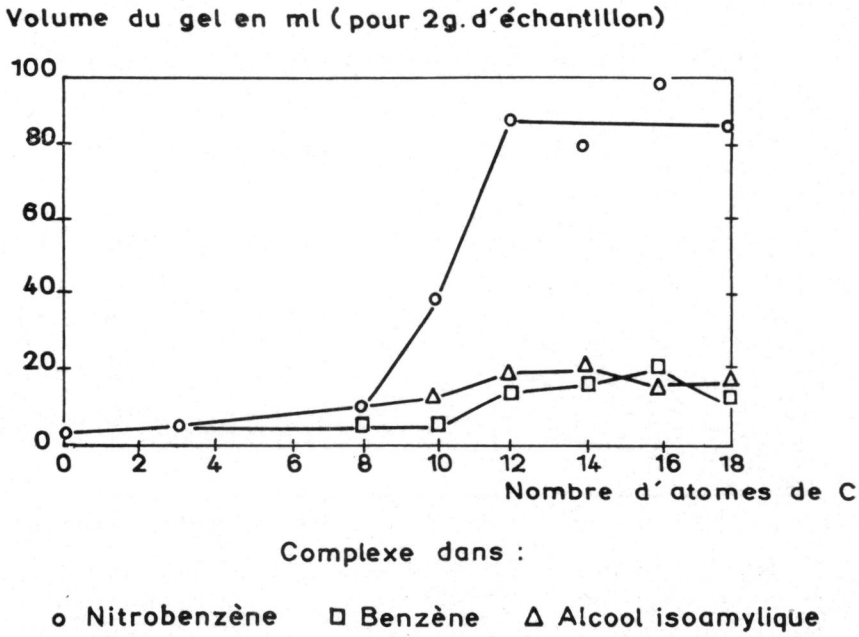


FIG. 35. — *Influence de la longueur des molécules d'amines aliphatiques sur le gonflement de différents complexes de la montmorillonite* (JORDAN, 1949 *b*)

Nous voyons que les propriétés organophiles ne se manifestent qu'à partir de dix atomes de carbone. D'autre part, nous savons qu'à ce moment là l'amine couvre plus de la moitié de la surface interne (voir 3eme partie). Il en résulte que c'est la proportion de surface couverte qui détermine ce caractère. Le graphique précédent montre également l'influence de la constante diélectrique. Celle-ci est encore plus marquée quand le liquide d'immersion est constitué par un mélange d'alcool et de toluène (fig. 36).

Le liquide polaire (alcool) serait adsorbé sur la partie non couverte de la surface de l'argile, et rendrait toute la particule organophile, donc, compatible avec la partie hydrocarbonée du liquide solvatant. C'est celui-ci qui provoque essentiellement le gonflement, d'où la diminution du volume du gel quand le pourcentage d'alcool dépasse une certaine valeur.

La différence entre les alcools peut s'expliquer par le fait que les petites molécules (méthanol, éthanol) peuvent atteindre la surface entre les grosses molécules d'amine, alors que les molécules plus grandes (octanol) ne le peuvent pas ou peu.

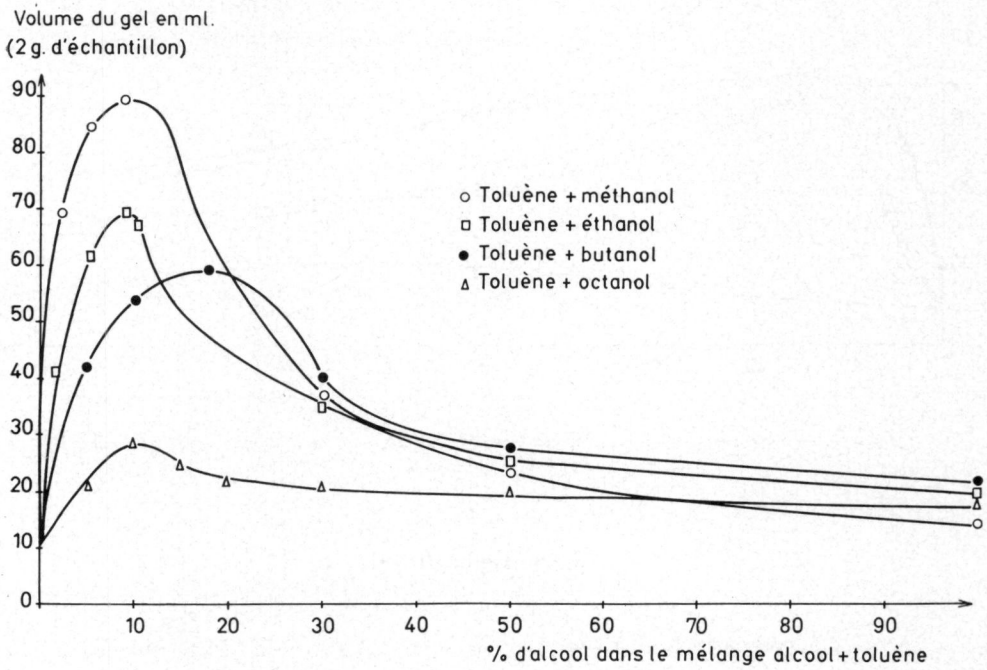


FIG. 36. — *Gonflement du complexe montmorillonite-octadécylammonium dans différents mélanges toluène + alcool* (JORDAN, 1949 *b*)

L'action d'un mélange (ester + toluène) s'explique de la même façon (fig. 37). Les molécules de stéarate de butyle sont certainement moins aptes à rendre la surface organophile que les molécules, plus petites, de formiate d'éthyle.

Pour que les molécules pénètrent entre les feuillets, deux conditions sont nécessaires :

— il faut une haute énergie d'adsorption du liquide sur l'argile non couverte, d'où l'action des corps polaires.

— Il faut une haute énergie de solvatation du liquide pour la couverture organique.

Ces conditions sont remplies par un liquide seul, le nitrobenzène, ou par un mélange binéaire (alcool + toluène).

Notons, toutefois, qu'il peut arriver que la première condition ne s'avère pas nécessaire. C'est le cas du gonflement des complexes formés à partir de sels d'ammo-

nium quaternaire dans les hydrocarbures (JORDAN). Ceci est probablement dû au pourcentage élevé de la surface couverte.

Deux points sont donc particulièrement intéressants :

— les complexes s'hydratent moins bien que les argiles seules.

— les complexes gonflent dans les liquides organiques.

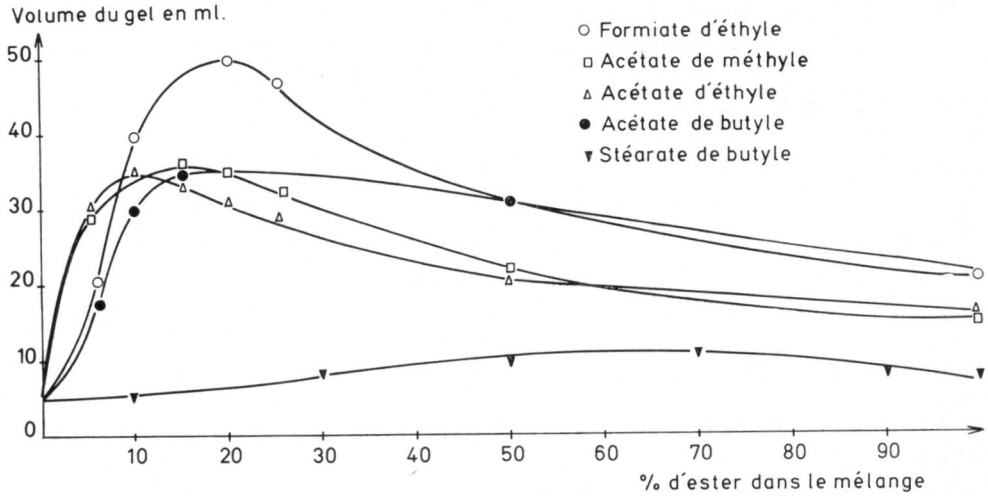


FIG. 37. — *Gonflement du complexe montmorillonite-octadécylammonium dans différents esters* (JORDAN, 1949 *b*)

II — Applications

A. — DÉCOMPOSITION BIOLOGIQUE DES SUBSTANCES ORGANIQUES DES SOLS

Nous savons que les protéines, les nucléoprotéines, les diastases, et les composés hydrocarbonés, sont adsorbés sur les argiles (ENSMINGER, GIESEKING, TALIBUDEEN GORING, COTNOIR).

La résistance de ces composés adsorbés à l'attaque des microorganismes a été maintes fois observée par différents chercheurs : MATTSON (1932). GRAHAM trouva d'ailleurs qu'un mélange de silice et de gélatine (92 p. 100) ne putréfiait pas. Quand des protéines sont fixées sur la montmorillonite, elles sont plus facilement dégradées lorsqu'elles se trouvent à l'extérieur des feuillets (PINCK, DIAL et ALLISON, 1954). Ces auteurs pensent que cela est dû au fait que les enzymes ne peuvent pas pénétrer entre les feuillets. Or, nous savons qu'elles le peuvent ; par conséquent, une autre cause doit être recherchée. D'un autre côté, ENSMINGER et GIESEKING (1942) observent que la vitesse d'hydrolyse diminue quand la capacité d'échange augmente. Ils indiquent deux raisons :

— l'adsorption de l'enzyme la rend inactive.

— l'adsorption de la protéine l'oriente de façon que les groupes actifs ne soient pas accessibles à l'enzyme.

De semblables observations ont été faites par MacLaren et Esterman (1954, 1956, 1957).

Si la décomposition des protéines est influencée par son adsorption, il est logique de penser qu'il en sera de même des nucléoprotéines et des hydrates de carbones.

Pink (1962) a récemment étudié la fixation des antibiotiques sur la montmorillonite et sur la Kaolinite. Les antibiotiques basiques et amphotères peuvent s'adsorber ; leur activité est nulle pour les premiers, diminuée pour les seconds. Les antibiotiques acides ou neutres ne se fixent pas.

On touche ici, un facteur intervenant dans l'évolution de la matière organique. Cependant, les connaissances actuelles sont insuffisantes pour aller plus loin dans son étude.

B. — Agrégation des particules argileuses

Ce phénomène n'est pas encore complètement éclairci. Ce que l'on sait, c'est que des ponts organiques se forment probablement entre les particules argileuses.

Par ailleurs ces corps très chargés tels que les polyélectrolytes (Ruehrwein et Ward, 1952) modifient les propriétés colloïdales des argiles. En effet, ils les floculent à faible concentration (5 — 20 meq/l 10^6), et ils stabilisent le floculat qui se disperse difficilement. Davidson et *al.* (1962) ont proposé une explication de cette stabilisation.

Cependant il est bien connu que la matière organique des sols contribue à leur stabilité, mais il n'est pas possible de dire comment. Les modifications des propriétés électriques des particules, les caractères hydrophobes des complexes, jouent certainement un rôle. Quelle est l'importance de ces facteurs, comment interviennent-ils exactement, sont-ils les seuls ? Ce sont autant de questions auxquelles il n'est pas possible de répondre.

C. — Étude des Argiles

1. — *Les tests de coloration*

Certains corps peuvent subir une transformation au contact de la surface de l'argile. Cette transformation, oxydation ou réaction avec des protons, fait apparaître une coloration. Dans la mesure où ces phénomènes dépendent de la nature des argiles, il est possible de les utiliser pour leur détermination. Il s'agit là d'une méthode rapide, simple et qui peut s'utiliser directement sur le terrain.

Behrens (réf. cit. in Grim, 1953 *b*) en 1871 semble être le premier à avoir utilisé ces tests en minéralogie. Faust, Mielenz (réf. cit. in Grim, 1953 *b*) reprirent ensuite ces questions. D'une façon générale, la variation de couleur est faible ou absente avec les argiles à faible capacité d'échange, et au contraire très prononcée avec les argiles à capacité d'échange élevée. Les corps agissant par une réaction acide-base sont le triphénylméthane et les colorants azoïques et ceux qui agissent par une réaction d'oxydo-réduction sont la benzidine et d'autres amines aromatiques.

L'application de ces tests doit se faire avec beaucoup de précautions car les impuretés des minéraux (oxydes de manganèse, oxydes de fer), les traitements qu'ils subissent, ont une grande influence sur l'apparition et la nature des colorations. La méthode la plus complète a été décrite par Mielenz : action de la benzidine sur l'ar-

gile non traitée, puis de la safranine Y et du vert malachite sur l'argile traitée par un acide. Cependant, il ne s'agit pas d'un moyen de détermination précis. La technique de diffraction des rayons X l'est beaucoup plus.

2. — *Étude par diffraction des rayons* X.

Les diagrammes de diffraction des rayons X varient beaucoup avec l'importance de la réflexion basale, qui est communément utilisée comme critère de détermination des argiles. Or, les premiers ordres observés sont parfois diffus et il est difficile d'interpréter les résultats obtenus à partir de mélanges.

Par contre, certains complexes organiques permettent d'obtenir des diagrammes très nets, invariables et indépendants du degré d'humidité (ceci est dû aux propriétés hydrophobes essentiellement). C'est ainsi que la montmorillonite traitée par le glycérol donne une valeur de *d* o o *l* de 17 Å, qui correspond à deux couches (BRADLEY, 1945 *b*).

Bien qu'il y ait une fixation sur la surface du cristal, les diagrammes des argiles du groupe de la kaolinite (kaolinite, nacrite, dickite) ne sont pas affectés. L'halloysite donne un complexe mixte avec le glycérol (*d* o o *l* = 10,8 Å) avec une couche d'eau et une de glycérol. Les caractères de celui-ci diffèrent de ceux de la métahalloysite et de la kaolinite.

Cette technique permet de déterminer la nature des argiles dans un mélange. La bravaisite (Montmorillonite + illite) donne également un complexe dont les résultats peuvent s'analyser à l'aide des fonctions de HENDRICKS et TELLER.

L'emploi du glycérol présente aussi les avantages de donner une méthode pratique et assez sensible (MACEWAN, 1960).

D. — ÉTUDE DE LA CONFIGURATION MOLÉCULAIRE

L'étude des valeurs de *d* o o *l* et des courbes de densité électronique donne des renseignements sur la configuration des molécules fixées entre les feuillets. HENDRICKS (1941) a montré, de cette façon, que l'adénine et la guanine étaient des molécules planes. Il a également trouvé que la structure des nucléosides, guanosides et adénosides était telle que le cycle ribofurannose se trouvait approximativement parallèle à celui de la base purique.

Ces résultats doivent s'accompagner d'une réserve. En effet, nous savons que les feuillets sont soumis à des forces d'attraction et il peut en résulter des modifications de la configuration moléculaire.

De plus ces modifications sont certainement accrues par les liaisons entre les molécules et les feuillets.

CONCLUSION

La diversité des mécanismes de formation des complexes et les incertitudes des hypothèses avancées, font qu'il est très difficile de donner une conclusion générale de cette revue bibliographique.

Par souci de clarté, nous avons arbitrairement classé ces complexes en trois

catégories. En fait, il est de nombreux cas où deux modes de liaison interviennent, ce qui montre bien la fragilité de cette classification.

Un des faits les plus saillants de cet exposé, est que l'application des méthodes physiques très fines à l'étude de la structure des complexes, ne conduit très souvent qu'à des résultats imprécis et difficiles à interpréter. Il en résulte que les explications données ne sont pas toujours satisfaisantes.

Cette mise au point bibliographique n'a évidemment pas la prétention d'être complète et de constituer un examen exhaustif des publications spécialisées. Il nous a semblé nécessaire, cependant, de rappeler un certain nombre de résultats expérimentaux concernant la formation et les propriétés des complexes organiques des argiles.

L'intérêt théorique de ce problème est évident, mais il est encore difficile d'envisager des applications pratiques immédiates. Néanmoins, il apparaît que cette étude doit permettre d'élucider, dans une certaine mesure, les phénomènes relatifs aux interactions entre les colloïdes minéraux et organiques du sol.

Reçu pour publication en novembre 1962

SUMMARY

A BIBLIOGRAPHICAL REVIEW OF THE ORGANIC COMPLEXES OF CLAY

Due to the diversity of the mechanisms of complex formation and to the incertitudes of the hypotheses propounded, it is difficult to arrive at a general conclusion from this bibliographical review.

With a view to clarity, the complexes have arbitrarily been classified into three categories. Actually, it often occurs that complexing occurs in two ways, showing the shortcomings of this classification.

One of the most prominent fact shown by this review, is that very fine physical methods in the study of the structure of complexes often yield inexact results which are difficult to interpret. Consequently, the explanations given are not always satisfactory.

This bibliographical review does not aim at being complete and giving an exhaustive study of special papers. However, it appeared necessary to give a certain number of experimental results on the formation and properties of the organic complexes of clay.

Though the theoretical interest in this problem is obvious, it is still difficult to see its immediate application in practice. Nevertheless, this study should elucidate to a certain extent the processes intervening between the mineral and organic colloids of the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

RICHTIGSTELLUNG, DIE LITERATUR ÜBER ORGANISCHE TON-KOMPLEXE BETREFFEND

Die Verschiedenartigkeit der Bildungsmechanismen der Komplexe und die Ungewissheit der vorgeschlagenen Annahmen machen es schwer, eine allgemeine Schlussfolgerung dieser Literaturschau zu ziehe.

Der Klarheit halber teilten wir diese Komplexe willkürlich in drei Kategorien. In der Tat aber kommen in zahlreichen Fällen zwei Bindungsarten vor, was die geringe Solidität dieser Einteilung zeigt.

Es ist eine der markantesten Tatsachen unserer Ausführung, dass die Anwendung physikalisch sehr feiner Methoden für das Studium der Komplexstruktur zu ungenauen und schwer auslegbaren Ergebnissen führt. Deshalb sind die Erklärungen hierzu nicht immer sehr zufriedenstellend.

Diese Richtigstellung der Literatur beansprucht keineswegs vollständig noch eine erschöpfende Untersuchung der Fachzeitschriften zu sein. Es erschien uns jedoch notwendig, eine gewisse Anzahl experimenteller Ergebnisse über Bildung und Eigenschaften der organischen Ton-Komplexe in Erinnerung zu bringen.

Das theoretische Interesse dieses Problems ist offenkundig, aber die unmittelbaren, praktischen Anwendungen sind noch schwer vorauzsusehen. Möge jedoch dieser Beitrag in einem gewissen Masse die Erscheinungen der Wechselwirkungen zwischen mineralischen und organischen Bodenkolloiden klären.

РЕЗЮМЭ

Библиографические итоги изучения органических комплексов глин.

Р. КАЛЬВЭ (Центральная Агрономическая Станция, Версаль).

В виду разнообразия процессов формирования комплексов, а также и непрочности выдвинутых гипотез, автору не представляется возможным подвести общий итог этого библиографического очерка.

Для большей ясности, все комплексы были им произвольно помещены в три различных категории. Но на деле, часто попадаются случаи связанности двух родов, что и доказывает непрочность этой произвольной классификации.

Тот факт, что приведенные об'яснения — часто недостаточны, — является одной из отличительных черт настоящего очерка. Это об'ясняется тем, что применение чувствительных физических методов при изучении структур, приводит очень часто к получению весьма неточных и трудно поддающихся интерпретации результатов.

Подведенные библиографические итоги конечно не полны и не дают исчерпывающего разбора специальной литературы по этому вопросу. Автор просто счел необходимым напомнить некоторые экспериментационные результаты изучения формирования и качеств органических комплексов глин. Практически, интерес этого вопроса — ясен, но трудно еще предвидеть его ближайшие практические применения.

Автор однако надеется что данная работа позволит раз'яснить в некоторой мере явления вытекающие из взаимодействия минеральных и органических комплексов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARAGON F., CANO-RUIZ J., MACEWAN D. M. C., 1959. β type interlammellar sorption complexes. *Nature*, **183**, 740-741.

BARSHAD I., 1950. The effect of the interlayer cations on the expansion of the mica type of crystal lattice. *Amer. Mineralogist.*, **35**, 225-238.

BARSHAD I., 1952. Factors affecting the interlayer expansion of vermiculite and montmorillonite with organic substances. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 176-182.

BATES T. F., HILDEBRAND F. A., SWINEFORD A., 1950. Morphology and structure of endellite and halloysite. *Amer. Mineralogist*, **35**, 463-484.

BLANCHET R., 1960. Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes métalliques et des argiles. *Ann. Agron.*, **11**, 55-74.

BLOCH J. M., CHARBONNEL J., 1955. Obtention et étude de montmorillonites cuivriques. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **4**, 511-513.

BRADLEY W. F., 1945 *a*. Molecular associations between montmorillonite and some polyfonctionnal organic liquids. *J. Amer. Chem. Soc.*, **67**, 975-981.

BRADLEY W. F., 1945 *b*. Diagnostic criteria for clay minerals. *Amer. Mineralogist.*, **30**, 704-713.

BRADLEY W. F., GRIM R. E., 1948. Colloid properties of layer lattices. *J. Phys. Chem.*, **52**, 1404-1413.

BRINDLEY G. W., HOFFMANN R. W., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 546-556. Pergamon Press, New York.

CHAUSSIDON J., 1961. Étude de l'environnement ionique et des propriétés électrochimiques de surface de particules d'argile en suspension., 108. *Thèse Paris*.

CLOOS P., FRIPIAT J. J., 1958. L'acétylation de la kaolinite. *Pédologie, Gand.*, **8**, 13-24.

COWAN C. T., WHITE D., 1958. The mecanism of exchange reactions occuring between sodium montmorillonite and various N primary aliphatic amine salts. *Trans. Faraday Soc.*, **54**, 691-697.

COWAN C. T., WHITE D., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 459-467. Pergamon Press, New York.

DAVIDSON D. T., DEMIREL T. D., ROSAUER E. A., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 585-591. Pergamon Press, New York.

DEAN L. A., 1949. Fixation of soil phosphorus. *Adv. Agron.*, **1**, 391-409.

DEMOLON A., BARBIER G., 1929. Conditions de formation et constitution du complexe argilo-humique *C. R. Acad. Fr.*, **188**, 654-656.

DEUEL H., HUBER G., 1951. Organic derivatives of clay minerals. *Helv. Chim. Acta*, **34**, 1697-1701.

DEUEL H., HUBER G., 1952. Organic derivatives of clay minerals. Phenyl-montmorillonites. *Helv. Chim. Acta*, **35**, 1799-1802.

DEUEL H., 1960. *Trans. 7th Internat. Congr. Soil. Sci.*, **21**, 38-53.

DODD C. G., SATYABRATA RAY., 1960. in *Clays and Clay Minerals*, **9**, 237-251. Pergamon Press, New York.

DUCROS P., DUPONT M., 1962. Étude par résonance magnétique nucléaire des protons dans les argiles. *C. R. Acad. Fr.*, **254**, 1409-1410.

EISCHENS R. P., MAPES J. E., 1954. The infrared spectra of ammonia chemisorbed on cracking catalists. *J. Phys. Chem.*, **58**, 1059-1062.

ENSMINGER L. E., GIESEKING J. E., 1939. The adsorption of proteins by montmorillonitic clays. *Soil. Sci.*, **48**, 467-471.

ENSMINGER L. E., GIESEKING J. E., 1941. Adsorption of proteins by montmorillonite and its effects on the base exchange capacity. *Soil. Sci.*, **51**, 125-132.

ENSMINGER L. E., GIESEKING J. E., 1942. Resistance of clay adsorbed proteins to proteolytic hydrolysis. *Soil. Sci.*, **53**, 205-209.

FORD T. F., LOOMIS A. G., FIDIAM J. F., 1940. The colloidal behaviour of clays as related to their crystal structure. *J. Phys. Chem.*, **44**, 1-12.

FRIPIAT J. J., 1957. Propriétés de surface des alumino-silicates. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **8**, 23-48.

FRIPIAT J. J., VANCOMPERNOLLE G., SERVAIS A., 1960 *a*. Étude de l'acidité de surface des silicagels et alumino-silicates par titration en milieu non aqueux. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 250-259.

FRIPIAT J. J., CHAUSSIDON J., TOUILLAUX R., 1960 *b*. Study of dehydratation of montmorillonite and vermiculite by infrared spectroscopy. *J. Phys. Chem.*, **64**, 1234-1241.

FRIPIAT J. J., MORTLAND M., CHAUSSIDON J., UYTTERHOEVEN J., 1962. Interaction between NH_3 and expanding lattice clays. *J. Phys. Chem.* (*in* Press).

GASTUCHE M. C., VIELVOYE L., 1957. L'aluminium libre en surface de la kaolinite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **9**, 49-60.

GASTUCHE M. C., UYTTERHOEVEN J., 1960. Relation entre les propriétés de surface de la silice et son évolution dans les milieux naturels. *Colloque « Silice »*, Bruxelles.

GIESEKING J. E., 1939. The mecanism of cation exchange in the montmorillonite-beidellite-nontronite type of clay minerals. *Soil. Sci.*, **47**, 1-11.

GLAESER R., 1948. Sur les mécanismes de formation des complexes montmorillonite-acétone. *C. R. Acad. Sci.*, **226**, 935-937.

GLAESER R., 1954. Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables. *Thèse Paris*.

GREENE-KELLY R., 1955 *a*. Sorption of aromatic organic compounds by montmorillonite. Orientation studies. *Trans. Faraday Soc.*, **51**, 412-424.

GREENE-KELLY R., 1955 *b*. Sorption of aromatic organic compounds by montmorillonite. Packing studies with pyridine. *Trans. Faraday Soc.*, **51**, 425-430.

GREENE-KELLY R., 1956 *a*. Montmorillonite complexes with saturated ring compounds. *J. Phys. Chem.*, **60**, 808-809.

GREENE-KELLY R., 1956 *b*. The sorption of saturated organic compounds by montmorillonite. *Trans. Faraday Soc.*, **52**, 1281-1286.

GREENE-KELLY R., 1956 *c*. The swelling of organophilic montmorillonites in liquids. *J. Colloid Sci.*, **11**, 77-79.

GORING G. A. I., BARTHOLOMEV W. V., 1952. Adsorption of monocucleotides, nucleic acids, and nucleoproteins by clays. *Soil Sci.*, **74**, 149-164.

GRIM R. E., 1953 *a*. *Clay Mineralogy*, 43-82. McGraw-Hill Book Company, Inc, New York.

GRIM R. E., 1953 *b*. *Clay Mineralogy*, 250-277. McGraw-Hill Book Company, Inc, New York.

HAUSER E. A., REED C. E., 1937. Studies in thixotropy : II. The thixotropic behabiour and structure of bentonite. *J. Phys. Chem.*, **41**, 911-934.

HAUSER E. A., LEGETT M. B., 1940. Color reactions between clays and amines. *J. Amer. Chem. Soc.*, **62**, 1811-1814.

HAXAIRE A., 1956 *a*. Sorption des molécules azotées sur la montmorillonite. *Thèse Nancy*.

HAXAIRE A., BLOCH J. M., 1956 *b*. Sorption de composés organiques azotés par la montmorillonite. Étude du mécanisme. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **8**, 17-22.

HENDRICKS S. B., 1938. On the structure of the clay minerals : dickite, halloysite, and hydrated halloysite. *Amer. Mineralogist*, **23**, 295-301.

HENDRICKS S. B., NELSON R. A., ALEXANDER L. T., 1940. Hydratation mecanism of the clay mineral montmorillonites saturated with cations. *J. Amer. Chem. Soc.*, **62**, 1457-1464.

HENDRICKS S. B., 1941. Base exchange of the clay mineral montmorillonite for organic cations and its dependance upon adsorption due to Van der Waals forces. *J. Phys. Chem.*, **45**, 65-81.

HERZBERG G., 1960. *Molecular Spectra and Molecular Structure*, **2**, 239. 9. D. van Nostrand Company, Inc. Princeton. New-Jersey.

JORDAN W. S., 1949 *a*. Alteration of the properties of bentonite by reaction with amines *Mineralogist Mag.*, **28**, 598-605.

JORDAN W. S., 1949 *b*. Organophilic bentonites, I, swelling in organic liquids. *J. Phys. Chem.*, **53**, 294-306.

KAYSER E., BLOCH J. M., 1952. Sur certaines propriétés catalytiques présentées par la montmorillonite. *C. R. Acad. Sci.*, **234**, 1885-1887.

KAYSER E., BLOCH J. M., 1953. La fixation des teintures par la montmorillonite. *Chim. Industr.*, **69**, 1054-1058.

KOHL R. A., STERLING A TAYLOR., 1961. Hydrogen bonding between the carbonyl group and Wyoming bentonite. *Soil. Sci.*, **54**, 223-227.

LAUDELOUT H., 1957. Étude de la répartition des charges sur la surface des particules argileuses. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **9**, 61-66.

LYNCH D. L., WRIGHT L. M., COTNOIR L. S., 1956. Adsorption of carbohydrates and related compounds on clay minerals. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 6-9.

MACCONNEL D., 1950. The crystal chemistry of montmorillonite. *Amer. Mineralogist*, **35**, 166-172.

MACEWAN D M. C., 1944. Identification of the montmorillonite group of minerals. *Nature*, **154**, 577-578.

MACEWAN D. M. C., 1948. Complexes of clays with organic compounds. I. Complexe formation between. montmorillonite and halloysite and certain organic liquids. *Trans. Faraday Soc.*, **44**, 349-367.

MACEWAN D. M. C., TALIBUDEEN O., 1949. L'adsorption interlamellaire. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **16**, D-37-40

MACEWAN D. M. C., 1960. in *The X-Ray Identification and Crystal Structure of Clay Minerals*, 169-183. Mineralogical Society. Brow N. G., London.

MACEWAN D. M. C., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 431-443. Pergamon Press, New York.

MACLAREN A. D., 1954. Adsorption and reactions of enzymes and proteins on kaolinite. The action of the chymotrypsine and lysozyme. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 170-174.

MACLAREN A. D., ESTERMAN E., 1956. Adsorption and reactions of enzymes and proteins on kaolinite. *Arch. Biochem. Biophys.*, **61**, 158-173.

MACLAREN A. D., ESTERMAN E., 1957. Influence of the pH on the activity of chymotrypsine at a solid-liquid interface. *Arch. Biochem. Biophys.*, **68**, 157-160.

MACLAREN A. D., 1958. The adsorption and reactions of enzymes and proteins on clay minerals : kaolinite, and montmorillonite. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 239-243.

MATTSON S., 1932. The laws of soil colloidal behaviour, VII, Proteins and proteinated complexes. *Soil. Sci.*, **23**, 41-72.

MERING J., GLAESER R., 1953. Rôle de la valence des cations échangeables dans la montmorillonite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **5**, 61-71.

MHELITCH A., 1942. Adsorption of baryum and hydroxyl-ions by soil and minerals in relation to pH. *Soil. Sci.*, **53**, 115-123.

MITRA R. P., RAJAGOPALAN K. S., 1952. Origin of the base-exchange capacity and significance of its upper limiting value. *Soil Sci.*, **73**, 349-360.

MOREL R., 1957. Étude expérimentale des phénomènes d'échange sur différents minéraux argileux. *Ann. Agron.*, **8**, 52-72.

MOREL R., 1958. Observations sur la capacité d'échange et les phénomènes d'échange dans les argiles. *Bul. Gr. Fr. Argile*, **10**, 3-8.

MOORE W. J., 1957. *Chimie Physique*, 475-480, 2, Dunod, Paris.

MORTLAND M. M., 1958. Reactions of ammonia in soils. *Adv. Agron.*, **10**, 325-346.

PIMENTEL G. C., MACLELAN A. L., 1960. *The hydrogen bond*. 8, 1, WH Freeman and Company. London.

PINCK L. A., DYAL R. S., ALLISON F. E., 1954. Protein-montmorillonite complexes. Their preparation and the effects of soil microorganismes on their decomposition. *Soil Sci.*, **78**, 109-118.

PINCK L. A., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 520-529. Pergamon Press, New York.

RUEHRWEIN R. A., WARD D. W., 1952. Mecanism of clay aggregation. *Soil Sci.*, **73**, 485-492.

RUSSEL E. W., GREENLAND D. S., 1955. Organo-clay derivatives. *Trans. Faraday Soc.*, **51**, 1300-1307.

SERVAIS A., 1960. Contribution à l'étude de l'adsorption des amines par la montmorillonite. *Thèse Univ. cath. Louvain.*

SIESKIND O., WEY M. R., 1958 *a*. Sur l'adsorption d'amines aliphatiques par la montmorillonite. *Bull. B.Gr. Fr. Argiles*, **10**, 9-14.

SIESKIND O., WEY M. R., 1958 *b*. Influence du pH sur l'adsorption d'amines aliphatiques normales par la montmorillonite-H. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 74-76.

SIESKIND O., WHEY M. R., 1959. Sur l'adsorption d'acides aminés par la montmorillonite-H. Influence de la position relative des deux fonctions — NH_2 et — COOH. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 1652-1655.

SIESKIND O., 1960 *a*. Étude des complexes d'adsorption formés entre la montmorillonite-H et certains acides aminés. Isothermes d'adsorption à pH 2 et à 20°C. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 2228-2230.

SIESKIND O., 1960 *b*. Sur les complexes d'adsorption formés en milieu acide entre la montmorillonite-H et certains acides aminés. Leur structure. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 2392-2393.

SMITH C. R., 1934. Base exchange reactions of bentonite and salts of organic bases. *J. Phys. Chem.*, **56**, 1561-1563.

SLABAUGH W. H., 1952. The synthetis of organo-bentonite anhydrides. *J. Phys. Chem.*, **56**, 748-751.

SPENCER W. F., GIESEKING J. E., 1952. Organic derivatives of montmorillonite. *J. Phys. Chem.*, **56**, 751-753.

TAKAHASHI-HIROSHI., 1955. Effect of layers of water on the colored reactions of benzidine and over similar compounds with montmorillonite. *Bull. Chem. Soc. Jap.*, **58**, 55-58.

TALIBUDEEN O., 1955. Complexe formation between montmorillonoid clays and amino-acids and proteins. *Trans. Faraday Soc.*, **51**, 582-592.

TETTENHORST R., BECK C. W., BRUNTON G., 1962. in *Clays and Clay Minerals*, **11**, 500-519. Pergamon Press, New York.

UYTTERHOEVEN J., FRIPIAT J. J., DOKX L., 1959. L'acétylation des alumino-silicates. *Bull. Class. Sci. Bruxelles*, **6**, 611-624.

VENE J., 1957. *Chimie organique générale*, 291-300. Masson et Cie, Paris.

WALKER G. F., 1950. Vermiculite-organic complexes. *Nature*, **166**, 695-696.

Ann. agron., 1963, **14** (1), 119

CHRONIQUE DES LIVRES

JAVILLIER M., POLONOVSKI M., FLORKIN M., BOULANGER P., LEMOIGNE M., ROCHE J., WURMSER R. *Traité de Biochimie Générale. Tome II : Les agents des synthèses et des dégradations biochimiques. Premier fascicule : Vitamines, Oligéoléments, Hormones.* Masson et Cie, 1962, 700 p. Paris.

Le tome II du Traité de Biochimie Générale présente les constituants des systèmes enzymatiques qui président aux réactions biochimiques.

De ce point de vue, il est regrettable que le 1er fascicule soit divisé classiquement en : Vitamines, Éléments biocatalytiques et Hormones.

En effet, le terme trop restrictif « Vitamines » élimine beaucoup de coenzymes (cytochromes, plastoquinones), qui ne seront présentés que dans le second fascicule indépendamment de la thiamine, de la riboflavine, de l'acide folique, etc. Cette réserve faite, on ne peut que louer le plan généralement adopté pour chaque substance : Historique-Isolement-Structure-Synthèses-Propriétés physiques et chimiques-Méthodes de dosage-Répartition dans le monde vivant-Biosynthèse-Métabolisme et rôle physiologique.

Après une rapide revue de nos connaissances sur le rôle physiologique des oligoéléments, la 3e partie est consacrée aux hormones : Phytohormones, Hormones des Vertébrés, et Hormones des Arthropodes.

Avec ses nombreuses références bibliographiques, cet ouvrage sera indispensable non seulement aux biochimistes, mais également aux physiologistes, aux nutritionnistes, aux agronomes et aux médecins.

C. C.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 4-1963.

Dépôt légal : 2e trimestre 1963. — N° d'impression : 517.

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron., 1963, **14** (2), 121-193

631. 615 (44)

CONTRIBUTION AGRONOMIQUE A LA MISE EN VALEUR DE LA BRENNE (SOLS HYDROMORPHES) (1)

PREMIÈRE PARTIE

Simone PÉRIGAUD (2)

Station agronomique, Châteauroux (Indre)

A avec suite 20-2-1963

PLAN

INTRODUCTION

1re PARTIE

LA BRENNE.
PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA RÉGION.
LE PROBLÈME DE SA MISE EN VALEUR.

I. — SITUATION GÉOGRAPHIQUE

II. — SITUATION GÉOLOGIQUE

III. — TOPOGRAPHIE ET RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

IV. — LE CLIMAT

V. — LE MILIEU AGRICOLE ET HUMAIN

VI. — LES TENTATIVES DE MISE EN VALEUR DE LA BRENNE

VII. — CONCLUSIONS ET MÉTHODES D'ÉTUDE ADOPTÉES

(1) Thèse d'Ingénieur Docteur soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Clermont-Ferrand, 16 février 1963.

(2) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Massif central, Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

2e PARTIE

LES SOLS DE BRENNE — APERÇU PÉDOLOGIQUE.

I. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES PROFILS DE BRENNE

A. — Caractères communs à tous les profils.
B. — Caractères spécifiques de la Brenne centrale.
C. — Critères de différenciation entre les sols.
D. — L'hétérogénéité.
E. — Conclusions.

II. — APERÇU PÉDOLOGIQUE

A. — Les roches mères.
B. — Les différents types granulométriques de profils.
C. — Autres caractères analytiques.
D. — Essai d'interprétation pédologique.

3e PARTIE

LE COMPORTEMENT HYDRIQUE DES SOLS DE BRENNE. CONSÉQUENCES SUR LES PROBLÈMES DE PHYSIQUE DU SOL DANS LES SOLS HÉTÉROGÈNES ET HYDROMORPHES.

I. — PRINCIPES — DÉFINITIONS — MÉTHODES

II. — ÉTUDE DE DÉTAIL DES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

A. — Le climat des années 1959-60-61.
B. — Les différents types de sols.
C. — Le problème général de l'azote.

III. — CONCLUSIONS — LES OBSTACLES A LA MISE EN VALEUR DE LA BRENNE

A. — Les obstacles.
B. — Les perspectives d'avenir.

IV. — QUELQUES ASPECTS DE PHYSIQUE DES SOLS DANS LES SOLS HÉTÉROGÈNES ET HYDROMORPHES

A. — Réserves hydriques et potentiels capillaires.
B. — Comportement hydrique et stabilité de la structure.

4e PARTIE

CARTOGRAPHIE DE LA BRENNE — PRINCIPES ET EXEMPLES.

A. — PRINCIPES

B. — LA CARTOGRAPHIE DESCRIPTIVE

C. — L'INTERPRÊTATION DE LA CARTOGRAPHIE

CONCLUSIONS

ANNEXES

Géologie.
Climat.
Documents historiques.
Méthodes d'analyse totale des roches et argiles.
Coordonnées Lambert des points cités dans le texte.

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Dans le cadre des aménagements régionaux, le Service du Génie Rural de l'Indre a été chargé de l'établissement du plan de mise en valeur de la Brenne, région caractérisée entre autres par ses sols à hydromorphie temporaire, ennoyés l'hiver, très secs l'été, et par conséquent particulièrement défavorables à la culture. Le Service du Génie Rural, devant l'ampleur des problèmes posés, demandait en 1957 le concours de l'Institut national de la Recherche agronomique pour les études agronomiques préalables.

Soumises au rythme biologique annuel, les études entreprises ne peuvent apporter de solutions définitives en moins de 3 ans ; ce n'est donc pas la réponse simple impatiemment attendue sur la plan local que l'on trouvera dans les pages qui vont suivre : l'expérimentation en cours peut seule confirmer les hypothèses de travail actuelles et certains points restent encore à préciser, notamment dans le domaine de la fertilisation.

Mais l'activité consacrée à la Brenne a permis de poser le problème des études préalables à un type particulier d'aménagement de territoire. Elle nous a amené à préciser les bases d'une cartographie établie dans un but pratique bien déterminé : la mise en valeur de sols hydromorphes mal structurés.

C'est cet aspect du problème qui sera traité dans les pages qui viennent, où la Brenne sert d'exemple : dans chaque chapitre, des conclusions seront évidemment tirées au niveau régional, mais elles resteront souvent partielles, introduisant en fait la proposition d'études complémentaires d'ailleurs en cours. Par contre, sur le plan général, les conclusions sont plus immédiatement constructives.

Par un aperçu rapide des conditions géographiques et humaines, la 1 re partie pose le problème de la mise en valeur de la Brenne.

En 2e partie, les différents sols de Brenne sont décrits sous leur aspect pédologique. Il ne s'agit pas ici d'une présentation détaillée des critères nécessaires à la compréhension des conditions de pédogénèse des sols de Brenne : ce sujet peut constituer à lui seul l'objet d'une activité parallèle aux études de mise en valeur. Mais sans aller jusqu'à proposer des hypothèses dans ce domaine, certains problèmes peuvent pour le moins être posés et un minimum de support pédologique est donné à la cartographie.

La 3e partie traite du comportement physique de ces sols, essentiel pour le problème de leur aménagement : à partir d'une série d'exemples, l'aspect agronomique de la mise en valeur se trouve finalement nettement dégagé. Parallèlement, les limites de certains concepts traditionnels en physique des sols sont précisés.

A la lumière des résultats précédents, les bases de la cartographie sont proposées en dernière partie, illustrées de deux exemples de cartes et des diverses possibilités d'interprétation ultérieure. Les différents « types d'aménagement » correspondant aux différents « types de sols » constituent une interprétation agronomique de l'étude préalable à la mise en valeur de terrains hydromorphes.

PREMIÈRE PARTIE

LA BRENNE. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA RÉGION. LE PROBLÈME DE SA MISE EN VALEUR.

I. — SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Des quatre régions naturelles de l'Indre, Boischaut du Nord, Boischaut du Sud-Champagne et Brenne (fig. 1), cette dernière constitue sans nul doute la plus originale.

FIG. 1. — *La Brenne dans le département de l'Indre*

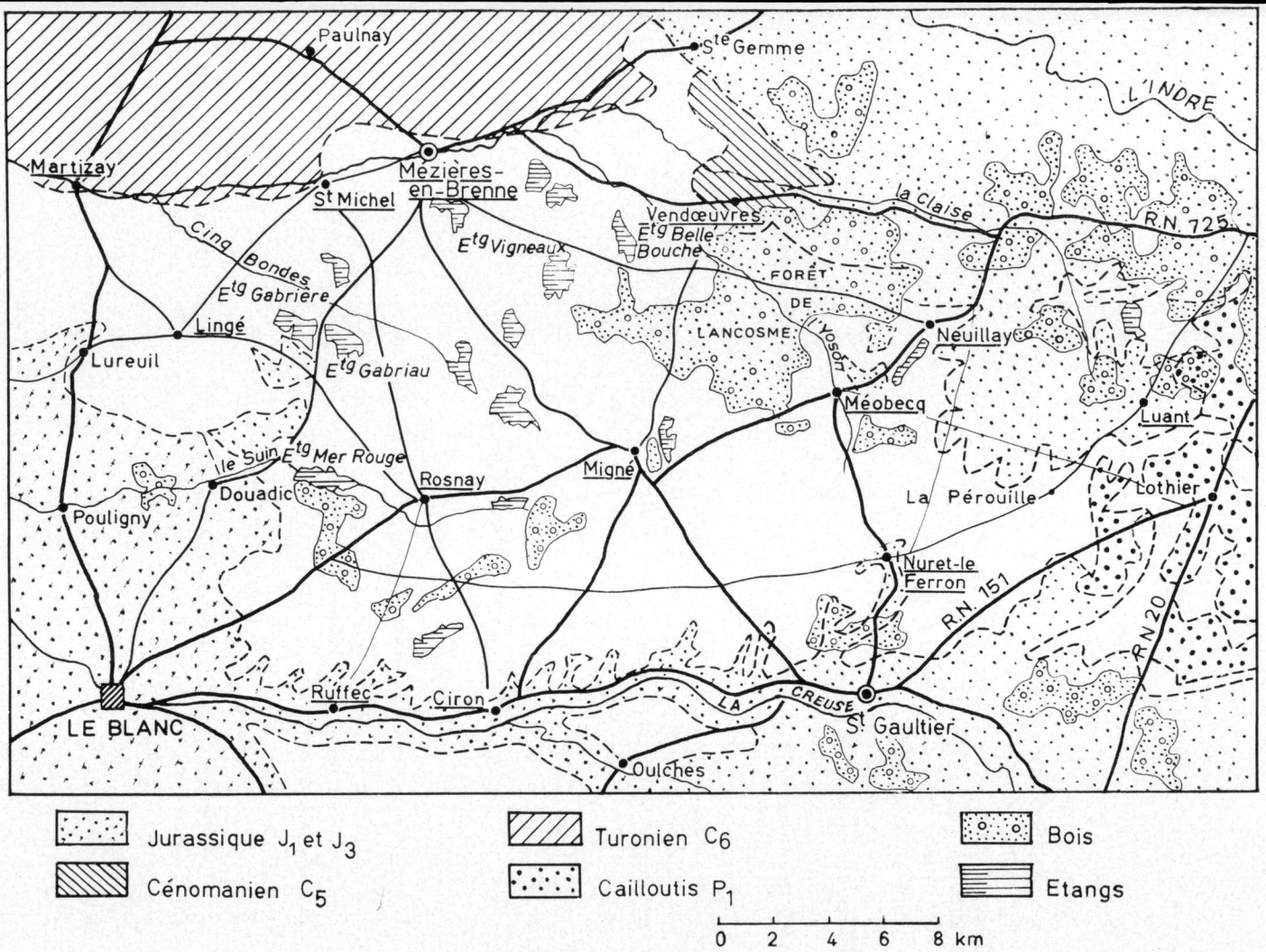


FIG. 2. — *La Brenne : ses limites géologiques, ses cours d'eau, étangs et forêts, ses principaux bourgs*
Formations Brenne laissées en blanc.

Sans frontière topographique nette, sa délimitation est difficile, mais bien visible sur une carte géologique par sa teinte vert bistré.

La Brenne proprement dite est un ensemble de 80 000 hectares à l'ouest-sud-ouest de Châteauroux, bordé (fig. 2) :

au sud par la Creuse,

au nord sensiblement, par la Claise et son affluent l'Yoson,

à l'est par la route nationale 20, Paris-Toulouse, puis la route de Lothiers à Saint-Gaultier,

à l'ouest, elle va jusqu'à Douadic au sud et se prolonge vers le département de la Vienne au nord.

C'est à cet ensemble caractéristique que se rapporte le véritable vocable de « Brenne » dans l'esprit du « Brennou ».

Au nord de la Claise, des placages de Brenne couvrent le secteur d'Azay et Paulnay, faisant la jonction avec le Boischaut Nord.

La Petite Brenne est, au sud de la Creuse, une bande de 10 à 15 km sur 30 de long d'Argenton au Blanc par Belâbre.

Les Queues de Brenne sont, à l'est de la route nationale 20 en plein sud de Châteauroux, de Velles, Buxières d'Aillac jusqu'à Lys-Saint-Georges.

L'ensemble de la Brenne proprement dite, de la petite Brenne et des Queues de Brenne couvre 146 000 ha répartis en 23 communes dont 6 seulement au centre, ne se partagent pas avec les régions voisines.

L'origine géologique de la Brenne explique sa topographie, son réseau hydrographique, ses paysages et ses sols.

II. — APERÇU GÉOLOGIQUE

1. — État actuel des connaissances sur la géologie de la Brenne

L'examen détaillé des cartes géologiques de Châteauroux et Aigurande montre que la Brenne est essentiellement constituée par des dépôts tertiaires reposant sur un substratum secondaire.

a) Le substratum

L'ensemble de la Brenne se situe à l'extrémité S.-O. du Bassin parisien, où l'on retrouve, en bordure du socle cristallin, la succession d'étages secondaires depuis le Trias jusqu'au Turonien.

Du S.-E. vers le N.-O., les formations se succèdent (fig : 3) présentant les caractères suivants :

1° *Le Trias* T, avec ses grès et argiles bigarrées,

2° *Le Lias inférieur* L_1 avec ses calcaires et marnes argileuses,

3° *Le Lias Moyen* L_3 : 30 mètres de marnes et calcaires. Il affleure à l'extrémité S.-E. de la carte géologique de Châteauroux (Lys-Saint-Georges),

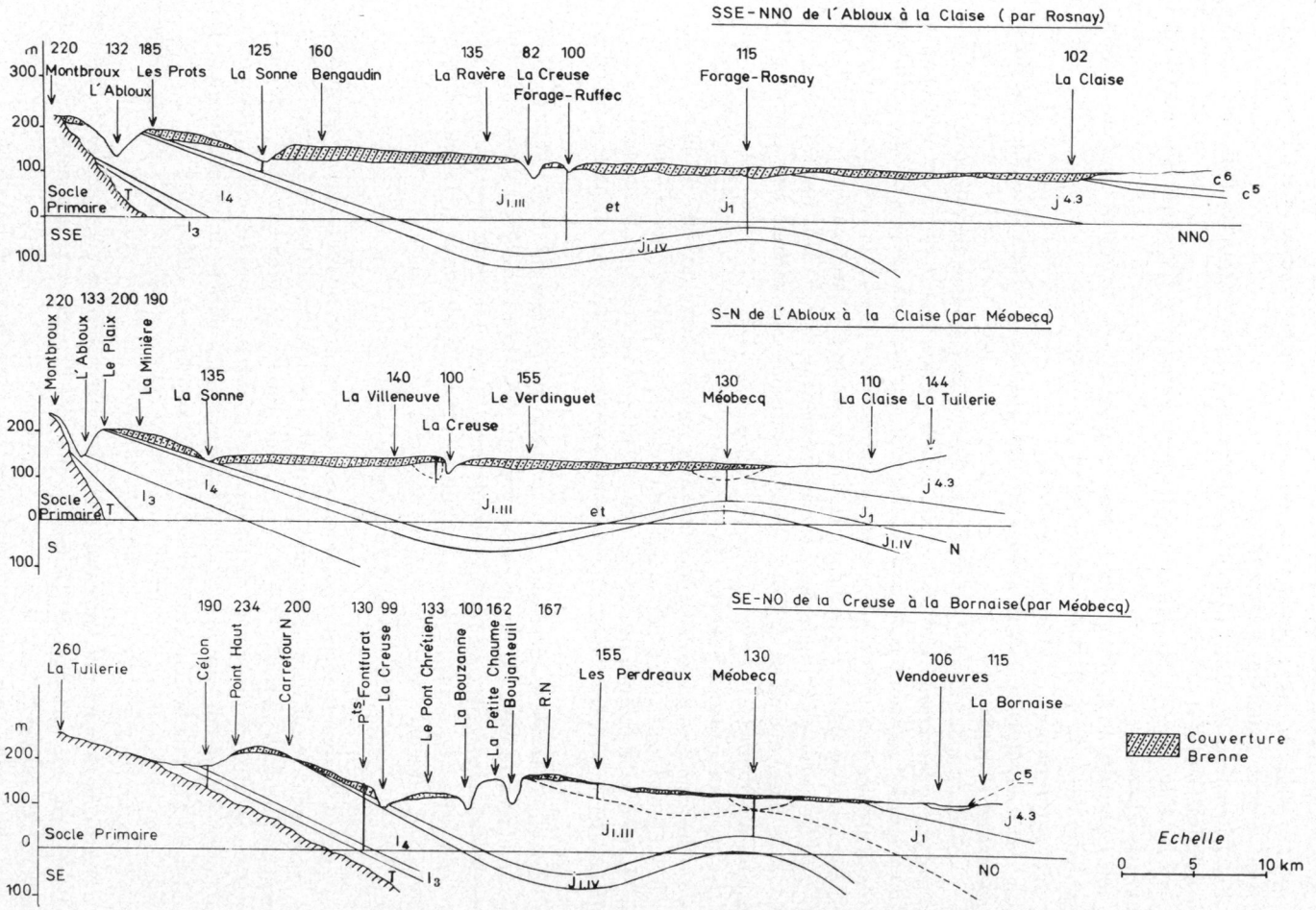


FIG. 3. — *Coupes géologiques (d'après forages)*

Légende : T Trias — L_3 Lias moyen — L_4 Lias supérieur — $J_{I.IV}$ Bajocien — $J_{I.III}$ Bathonien — J_I. Callovien. — J^{4-3} Rauracien — C^{5-4} Cénomanien — C^6 Turonien

4° Le *Lias Supérieur* L_4 : 60 m d'argiles (Montipouret),

5° *Le Bajocien* JIV : 20 à 30 m de calcaires bruns compacts enchâssant des rognons de silex (calcaire à entroques),

6° *Le Bathonien* JI III : 40 m. de calcaires oolithiques (exploités pour les fours à chaux (Saint-Gaultier),

7° *Le Callovien* JI, calcaires oolithiques, difficiles à distinguer du précédent (Ruffec-le-Château),

8° *L'Oxfordien* J_2 dont seul l'étage supérieur est représenté : marne vers l'extrémité S.-O. de la carte de Châteauroux (Le Blanc),

9° *Le Rauracien* $J_{4\cdot3}$ avec ses 2 séries :

— série corallienne à calcaires oolithiques grossiers au centre (Neuillay-les-Bois) et sud-ouest (Douadic),

— série lithographique, au centre et N.-E. (Champagne Berrichonne),

10° *Le Cénomanien* $C^{5,4}$: à la base, dalle grèso-calcaire jaunâtre, peu épaisse (Saint-Gemme), surmontée de sables plus ou moins argileux colorés en gris verdâtre par la glauconie et souvent ferrugineux. Ils affleurent en bordure nord de la Brenne à Vendœuvres et plus à l'ouest dans la Vienne jusqu'à Châtellerault.

11° *Le Turonien* C^6, représenté successivement de bas en haut par :

— la craie marneuse (15 m) exploitée comme amendement aux environs de Mézières-en-Brenne,

— la craie calcaire micacée (30 m),

— les calcaires gréseux (30 m) exploités comme pierre de taille à Clion.

— *Les argiles à silex* $C^6_{(\text{hachuré})}$, avec leurs silex fauves plus ou moins vitreux, sous forme d'éclats tranchants ou de rognons, Elles se rencontrent en bordure nord des dépôts tertiaires (Azay-Paulnay) étroitement imbriqués avec eux et parfois difficiles à distinguer.

Tous ces étages se succèdent avec un pendage général du S.-E. vers le N.-O. Des sondages récents [1] ont en outre mis en évidence l'existence d'un anticlinal dont le sommet se situe en plein centre Brenne (fig. 3) ; il forme une bande de 2 km de large orientée sensiblement est-ouest, de Neuillay-les-Bois à Le Bouchet par Méobecq et Migné.

b) Les dépôts éocènes

Ce sont les dépôts éocènes qui donnent à la Brenne son individualité géographique. Ils recouvrent le substrat secondaire décrit précédemment, depuis le Lias au S.-S.-E. jusqu'au Turonien au N.-N.-O. Les 80 000 ha de « Brenne proprement dite », telle qu'elle qu'elle a été définie dans la 1re page, correspondent au recouvrement du Rauracien. La Petite-Brenne au sud de la Creuse est sur le Lias Supérieur et le Bajocien. Ce qui est au Nord de la Claise appartient aux Cénomanien et Turonien.

α) *Description*

La formation Brenne est caractérisée par des sables, argiles, cailloutis, grès et arkoses ; elle est rattachée au Sidérolithique. Ces dépôts sont de constitution et de couleur très variées :

— les argiles sont pures ou sableuses, blanches, ocres ou bariolées.

[1] Sondages effectués par le Service du Génie rural pour recherches de points d'eau ; les coupes géologiques de la fig. 2 ont été faites par ce service d'après les résultats des sondages.

— les grès sont rouges, crème, veinés de jaune, de mauve, de rouge. Ils sont à grain plus ou moins grossier, à ciment plus ou loins argileux. Ici la formation est encore meuble, là c'est une pierre consolidée qui peut servir pour la construction.

— les cailloutis roulés sont blancs ou jaunâtres ; ici ils sont dispersés au sein des argiles ou des sables, là ils sont cimentés en gros pouddingues.

— A la base des dépôts éocènes et au contact du Jurassique on rencontre quelques gisements de fer pisolithique.

Cette formation remplit les fentes et les poches du Jurassique dont la surface est irrégulière ; l'épaisseur du Sidérolithique est donc localement très variable (voir le détail des différents sondages en annexe) ; elle peut atteindre 30 mètres mais être inexistante un plus loin : le calcaire corallien affleure même en pleine Brenne à Migné et Méobecq.

β) *Origine*

La formation Brenne est datée du Bartonien (Eocène Supérieur). Toutefois, le modelé du socle jurassique aurait commencé dès la fin du Secondaire (FACON, 1957), sous l'influence des cours d'eau plus ou moins violents descendant des montagnes granitiques du Centre..

D'après VATAN (1947) les différents dépôts de « Sidérolithique de transport » que l'on trouve au contact du Socle cristallin et des bassins Sédimentaires présentent trois faciès différents liés à leur origine distincte :

— éléments cristallins très altérés où l'on ne retrouve plus guère que des quartz roulés, de la kaolinite plus ou moins imprégnée de silice et du fer colloïdal, l'ensemble consolidé dès la fin de l'Éocène en brèches rouges ou grès très ferrugineux.

— éléments issus des étages secondaires inférieurs notamment avec ses grès, arkoses et argiles sableuses moins colorées,

— éléments du Jurassique, remaniés sur place : Bajocien avec ses galets de quartz roulés et ses chailles ; Crétacé avec ses éclats de silex et ses argiles blanches.

KLEIN (1961) a confirmé récemment que ce « cailloutis à chailles » fait bien partie intégrante de la formation Brenne et date de l'Eocène Moyen et Supérieur.

Des courants violents ont donc pénétré jusqu'au centre Brenne au sein de zônes lagunaires plus calmes et permis une juxtaposition étroite de dépôts caillouteux grossiers alluvionnaires et de très fins limons.

Ultérieurement, ces dépôts primitifs ont été déplacés et ont subi de profondes altérations au cours de périodes climatiques alternativement arides, chaudes et humides (FACON, 1957).

L'absence de soulèvement d'ensemble au Miocène aurait permis la conservation des aplanissements antérieurs et de la couverture détritique ; l'évolution se serait faite « en vase clos dans une zone tectoniquement figée » (DAUTRY, 1956).

Les forages récents ont cependant révélé, comme on l'a vu, la présence d'un anticlinal jurassique qui correspond précisément au secteur où l'érosion a pu avoir son maximum d'intensité ; c'est au sommet de l'anticlinal que les grès les plus durs ont été dégagés et modelés en « butons », véritables buttes-témoins d'un autre âge qui donnent à la Brenne centrale son paysage lunaire si typiquement « Brennou ».

La surface primitive semble donc s'être trouvée profondément remaniée avant même la fin du Tertiaire. Certains dépôts qui paraissent éoliens peuvent provenir de ce remaniement très ancien du matériau d'origine.

c) Autres dépôts miocènes, pliocènes et quaternaires

Les dépôts postérieurs à l'Eocène se juxtaposent aux précédents dans des secteurs géographiquement définis :

α) *Miocène*

Des eaux courantes semblent avoir superposé aux dépôts éocènes des sables et cailloux de quartz roulés, plus récents, probablement contemporains des Sables de Sologne, mais remaniés sur place avec des éléments sidérolithiques rouges ; c'est probablement la raison pour laquelle ils ne figurent pas sur la carte géologique. Ils se différencieraient pourtant des éléments éocènes par une proportion plus grande de feldspaths dans les sables et un type d'argile plus montmorillonitique (Wolkovitch, 1958) ; ils se localiseraient plutôt dans la forêt de la Biche, en bordure N.-E. de la véritable Brenne.

β) *Pliocène*

A cet étage sont rattachés, sur la carte géologique :

— les « cailloutis élevés », P1, terrains de transports formés de cailloux roulés, de quartz, d'éclats de silex, granules ferrugineux etc., enchâssés dans une argile très imperméable. Ces formations se trouvent au sud de Châteauroux, plus ou moins mêlés au Sidérolithique éocène en bordure de la forêt du Poinçonnet. Pratiquement les sols dérivant de ces 2 dépôts d'âge différent présentent sensiblement les mêmes caractères ; les plus récents ne sont toutefois jamais consolidés en grès.

— les « limons des plateaux », se distinguent en principe des précédents par l'absence d'éléments grossiers. D'après la carte géologique ils sont dispersés sur toute la Brenne. Pratiquement il n'a pas été possible de les différencier nettement des dépôts fins d'origine éocène, ni de les rapprocher des placages qui se rencontrent en Champagne berrichonne.

γ) *Alluvions anciennes*

Des alluvions anciennes se trouvent en bordure de la Creuse et de la Claise et encadrent par conséquent la Brenne.

Les terrasses de la Creuse sont assez nettement individualisées ; elles peuvent toutefois s'imbriquer, dans une même parcelle, avec les dépôts alluviaux datant de l'Éocène.

Au nord, en bordure de la Claise, la distinction est encore parfois plus difficile lorsque des éléments cénomaniens et turoniens se mêlent au Sidérolithique.

Si ces alluvions ceinturent la région, on en trouve toutefois des vestiges disséminées à la surface du sol à l'intérieur même de la Brenne.

δ) *Alluvions modernes*

D'après la carte géologique, des alluvions modernes sont portées en bordure de la plupart des étangs. De nos propres études, il ressort que l'importance de ce type d'alluvions est très limitée ; il peut correspondre soit à un rechargement en sables grossiers au sein des courants actuels, soit à un dépôt fin hydromorphe, de couleur noire, à l'emplacement d'anciens étangs desséchés.

2. — Répartition géographique des différents dépôts

L'origine de la formation Brenne explique la complexité de ses sols et l'hétérogénéité des dépôts à très faible distance quant à leur texture, leur structure, leur couleur.

Cependant, il existe une répartition géographique préférentielle des différents « types » (suivre la carte de Brenne ; fig. 2).

a) La Brenne proprement dite

Toute la pleine Brenne paraît correspondre aux dépôts détritiques, provenant des éléments du Cristallin et du Trias signalés par Vatan. Ils sont consolidés en grès, plus ou moins grossier, surtout quartzeux, avec ciment plus ou moins argileux kaolinique ; ils forment aussi des poches de sable meuble ou d'argile.

Des sondages décrits dans l'Annexe I et des examens faits sur le terrain au cours de prospections, il ressort que les différents types de grès, sableux cimentés ou argileux, se rencontrent sans répartition préférentielle sur toute la Brenne et se superposent sans ordre systématique : les dépôts gréseux qui forment l'embase systématique de la Brenne proprement dite ont des textures variables dans le temps et dans l'espace. Toutefois :

— le calcaire Rauracien affleure à Méobecq, Migné et dans des marnières anciennement exploitées près de Rosnay, de l'étang de la Motte. Le faciès est lithographique au N.-E. et corallien vers le S.-O.

— les dépôts éoliens se rencontrent surtout dans le secteur relativement plat du centre nord (étang des Vigneaux) ;

— le cailloutis de type alluvial prédomine sur le versant sud,

— le grès dur rouge, très ferrugineux appartient presque exclusivement à l'arête centrale est-ouest correspondant à l'anticlinal (le Château du Bouchet, qui domine l'étang de la Mer Rouge, est construit sur le plus haut buton de Brenne),

— les argiles ocres, marmorisées, sont plus près de la surface actuelle du sol sur le versant nord de l'anticlinal que partout ailleurs,

— les argiles blanches se présentent sous forme de gisements d'importance très réduite dans le quart N.-O. de la Brenne ; certains sont exploités pour la porcelaine (Sainte-Gemme),

— les minerais de fer pisolithiques du contact jurassique, sont au nord de la Brenne, vers l'est (anciennes forges de Bonneau, le Caillaudière et Corbançon) et vers l'ouest entre Lureuil et Tournon.

b) Les bordures de Brenne

En bordure de Brenne, les grès décrits ci-dessus ne reposent plus que de façon sporadique sur les formations géologiques voisines ; les placages éocènes peuvent être très limités et l'on se trouve devant une mosaïque de sols à l'échelle de la parcelle. Parfois la différenciation est nette mais souvent, comme l'a signalé Vatan, les élé-

ments secondaires ont été eux-mêmes remaniés et profondément altérés ; l'identification précise des différentes origines est alors difficile.

Ces « Bordures de Brenne » reposent sur les étages secondaires précédemment décrits.

Au sud (bordure Creuse).

— *Les calcaires oolithiques du Bathonien et du Callovien,* déblayés par place, ont libéré les silex du contact *bajocien* et d'importants lits de cailloux roulés se retrouvent au sein des argiles éocènes (Nuret-le-Ferron, sud-est) ;

— *Les alluvions très anciennes* se confondent souvent sur la rive droite de la Creuse, avec les silex bajociens et les formations éocènes remaniées ; elles présentent tous les termes de passage vers le grès : îlots de pouddingues de gros quartz blancs alluvionnaires, cailloutis à chailles de Ciron, Ruffec, Douadic (sud-ouest)

Au nord (bordure Claise).

— *Le Cénomanien* avec ses grès calcaires et sa craie glauconieuse n'apparaît en place qu'au nord-est de la Claise. Les sables argileux gris verdâtre se retrouvent à Vendœuvres. L'ensemble paraît avoir donné naissance en partie aux sols quartzeux légèrement calcaires et glauconieux des bordures de cette rivière.

— *Le Turonien* plus à l'ouest donne les quelques carrières de craie marneuse exploitées pour les amendements à Mézières-en-Brenne. Les argiles à silex sont surtout au nord de la Claise vers Paulnay (mais on en retrouve des lambeaux beaucoup plus vers le Sud au milieu des formations du centre Brenne) ;

— *Les alluvions très anciennes.* Elles se retrouvent sur les deux rives de la Claise plus ou moins mêlées aux autres dépôts cénomaniens (sablières de Mézières).

3. — Conséquences sur les sols

Ces différents types de dépôts qui respectent ainsi un certain ordonnancement à très grande échelle géographique — malgré l'hétérogénéité extrême au niveau de la parcelle — sont à l'origine de nuances sensibles dans le modelé du relief actuel, dans l'exploitabilité des sols et par conséquent dans les paysages.

Toutefois l'origine géologique de la Brenne imprime son caractère fondamental à la région : le sous-sol imperméable, qu'il soit constitué par les grès ou par l'argile, ne laisse pas l'eau pénétrer dans la sens vertical. Le niveau d'affleurement de cet horizon imperméable, localement très variable par l'hétérogénité granulométrique des dépôts, rend difficile la circulation interne et latérale de l'eau.

Ces difficultés d'écoulement concourent à maintenir les sols de Brenne gorgés d'eau, même en pleine pente ; elles entretiennent la dégradation de leur structure à laquelle l'origine détritique du matériau les prédispose par la désaturation de son complexe adsorbant.

Elles font obstacle à l'enracinement et diminuent encore l'épaisseur de sol exploitable, déjà faible, au-dessus des grès ; les possibilités d'accumuler des réserves en eau sont donc réduites.

Sols pauvres, ennoyés l'hiver, très secs l'été, telles sont les conséquences immédiates de l'origine géologique de la Brenne.

III. — TOPOGRAPHIE ET RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Les dépôts variés, tant dans leur épaisseur, leur granulométrie que dans leur répartition et l'absence de mouvement orogénique important ont abouti à modeler une région de caractère spécifique (fig. 2).

1. — Topographie

L'arête centrale anticlinale est-sud-est ouest-nord-ouest, de 3 à 4 km de large vers l'ouest, au nord de Rosnay et plus étroite vers l'est au-delà de Migné, correspond aux grès durs, qui ont le mieux résisté à l'érosion : c'est le « Sahara de la Brenne », zône la plus élevée avec son paysage particulier de « butons », pustules de grès dénudées de 30 à 50 mètres de diamètre, véritables pitons à formes arrondies où s'accrochent quelques rares ajoncs ou petites bruyères : Ce sont les célèbres dépâtures de Gargantua. Dispersés sans aucun ordre, rapprochés parfois à moins de 100 mètres les uns des autres, ces butons dominent de 10 à 30 mètres des séries de cuvettes communiquant plus ou moins bien entre elles ; les eaux de pluies s'y accumulent, incapables de s'infiltrer en profondeur ou de s'écouler latéralement : c'est la région des petits étangs de quelques hectares où se reflètent les couchers de soleil derrière les butons rougeoyants ; c'est le monde du silence, brutalement troublé par les cris d'une mouette.

De cette arête centrale, dont l'altitude varie de 115 à 125 mètres, descendent les deux versants de la Brenne, vers ses 2 rivières, la Claise au nord, la Creuse au sud, toutes deux aux environs de 85 mètres. Mais la pente n'est pas régulière.

Vers le nord, la descente est assez rapide sur le premier émissaire que constitue le ruisseau du Blizon, prolongé par le ruisseau des Cinq-Bondes d'altitude à peine plus élevée que la Claise elle-même, C'est la zone de fortes pentes où le grès est encore très près de la surface. C'est, au pied, la région des grands étangs, relativement peu nombreux, mais bien délimités et de superficie importante : étangs du Sault, du Bignotoi, étangs du Blizon, Gabriau et Gabrière.

Par contre du ruisseau des Cinq-Bondes à la Claise, il n'existe qu'un très léger dôme. Le grès y est plus profond, recouvert d'argiles ou de sables, mais les pentes sont si faibles que les étangs nombreux, sans profondeur, envahissent toutes les terres : ainsi les étangs de la Métairie, du Piégu, Renard, des Vigneaux, Bellebouche, dont on ne voit que les « queues » sans fin envahies de mottes de joncs et de carex ; et au-delà, de la molinie : tant qu'il ne se laisse pas surprendre par un gros orage et nne brutale inondation des routes, le promeneur n'a pas ici l'impression de se trouver au milieu de l'eau.

Vers le sud, la descente est assez rapide jusqu'au pied même de la zone centrale des butons où coule le Suin, depuis le grand étang de Migné (112 m) par l'étang du Coudreau jusqu'à l'étang de la Mer Rouge (100 m), que domine le château du Bouchet construit sur le plus haut buton de Brenne (134 m).

Mais ensuite, à la différence du versant nord, l'ensemble remonte pour constituer une sorte de plateau en forme de dôme, très largement modelé, qui, d'une altitude voisine de celle de l'arête centrale, retombe progressivement au pied de la barrière que constituent les anciennes terrasses de la Creuse (130 m). S'il existe encore ici des cuvettes ennoyées et quelques étangs (Fourdines), la présence de petites vallées qui coupent les terrasses pour rejoindre la Creuse fait de ce secteur une région relativement plus saine que dans le Nord.

2. — Les émissaires naturels

Les deux rivières qui constituent finalement les émissaires de la Brenne impriment par leur différence de comportement hydraulique, des nuances nettes aux régions qu'elles drainent.

a) *La Claise* (qui se jette dans la Creuse dans le département de l'Indre-et-Loire) est une rivière peu profonde (50 à 80 cm en moyenne) large de 4 mètres à Neuillay-les-Bois à l'est, mais de 14 mètres en aval de Martizay à l'ouest. Par ses affluents des deux rives, elle draine environ 60 000 ha. Sa pente originellement convenable — près de 1 mm/m — s'est trouvée réduite à 0,4 mm/m par une série de barrages de moulins aujourd'hui désaffectés. Son simple curage est inefficace : son cours se réenvase très rapidement, envahi de plantes aquatiques. Elle ennoie toutes les terres environnantes en périodes d'orages, sans pouvoir dans ces conditions servir d'émissaire à tous les étangs qui appartiennent à son versant.

b) *La Creuse* est par contre une rivière dont le lit permet d'évacuer les eaux des terres de Brenne, d'autant plus facilement que sa cote est beaucoup plus basse que les terres intéressées. Mais elle ne draine finalement qu'une petite partie de la Brenne : son affluent le Suin qui traverse la Brenne au sud de Rosnay a un régime voisin de celui du ruisseau des Cinq-Bondes ; ce n'est qu'un ruisseau au parcours sinueux et à faible pente qui sert surtout de vidange aux étangs.

3. — Conséquences, les étangs

La Brenne apparaît ainsi comme une région à relief général faible, dépourvue dans l'ensemble de réseau hydrographique bien organisé : les eaux de pluie, incapables de s'infiltrer dans un sous-sol imperméable ne peuvent pas non plus s'évacuer latéralement : Tous les bas-fonds restent longuement ennoyés l'hiver, aggravant l'inaccessibilité des terrains plus élevés, mal ressuyés eux-mêmes ; ils font une gageure du plus petit effort de culture normale.

La moindre petite digue est par contre à l'origine d'un étang peu profond qui submerge des surfaces d'autant plus importantes que son niveau maximum n'est pratiquement pas toujours bien défini. Ces étangs — au nombre de 500 environ — couvrent actuellement 4 à 5 000 ha entre la Claise et la Creuse : ils se déversent les uns dans les les autres par groupes et sous-groupes correspondant à un même bassin versant jusqu'à l'émissaire général qui sert de collecteur : on compte ainsi cinq groupes principaux sur le versant nord et six sur le versant sud, beaucoup plus nombreux

dans le nord dépendant de la Claise que dans le sud mieux drainé par la Creuse. Tous ces étangs dont la surface en hautes eaux varie de 1 à 130 ha (Les Vigneaux), sont tous peu profonds (2 m au maximum à la bonde, plus souvent 0,55 m ou 0,80 m). Alimentés parfois par une source, mais beaucoup plus par les eaux de ruissellement, ils entretiennent une abondante végétation sur les bords et un véritable marais improductif de joncs et carex prolongés par la molinie. Leurs vidanges brutales et désordonnées quand leur propriétaire décide — tous les 3 à 8 ans — de les pêcher, concourent à ensabler les rivières et à accuser l'ennoyage des terres.

Ces étangs ne constituent même pas une source de revenu appréciable : ils produisent surtout de la carpe peu appréciée, quelques gardons, tanches et brochets, avec un rendement de 80 à 120 kg par ha d'eau. Ils ne sont pas « cultivés ». Mais ils présentent le gros avantage, pour les cultivateurs, de maintenir au milieu des carex une surface de fraîcheur relative pour le bétail en été.

IV. — LE CLIMAT

Il n'y a aucun relevé météorologique ancien qui permette d'avoir des notions précises sur le climat spécifiquement Brennou [1]. Les moyennes de Châteauroux suffisent pourtant à situer la région dans son cadre général.

1. — Moyennes de Châteauroux

On trouvera en annexe les détails des différentes « moyennes » et des écarts à ces moyennes.

a) Températures

Comme dans toutes les régions sous dominance atlantique, les températures moyennes ne sont pas très basses en hiver (+ 3°,4 en janvier), ni très élevées en été (19°,9 en juillet). La moyenne annuelle est de 11°,5, mais les écarts d'une année à l'autre sont assez importants. Des influences continentales se font vivement sentir parfois et les températures absolues peuvent être momentanément très extrêmes (maximum enregistré —21°,5 en janvier ; maximum 40°,5 en août).

Les gelées faibles sont fréquentes pendant les 3 mois d'hiver et assez courantes au printemps jusqu'en mai. Mais les températures inférieures à —5° sont rares, celles inférieures à —10° sont exceptionnelles.

A l'opposé, de fortes chaleurs (au-dessus de 25° et même 30°) sont possibles dès avril. En juin et surtout juillet, elles peuvent durer presque tout le mois.

Les écarts journaliers ne sont en général pas très importants. En été, dans la période de plus forte insolation, une baisse trop faible de 5° à 7° seulement rend les nuits de juin souvent pénibles.

[1] Les éléments ayant servi de base à la rédaction de ce chapitre ont été fournis par les Services météorologiques de l'Indre.

b) Pluviométrie

La pluviométrie annuelle s'élève aux environs de 700 mm, variant largement entre 600 et 800 mm. La fig. 4 montre, sous la forme d'un polygone de fréquence, que les pluviométries supérieures à 900 mm ou inférieures à 500 mm ont une fréquence de 10 p. 100 : autrement dit les années très sèches ou très pluvieuses ne sont pas exceptionnelles.

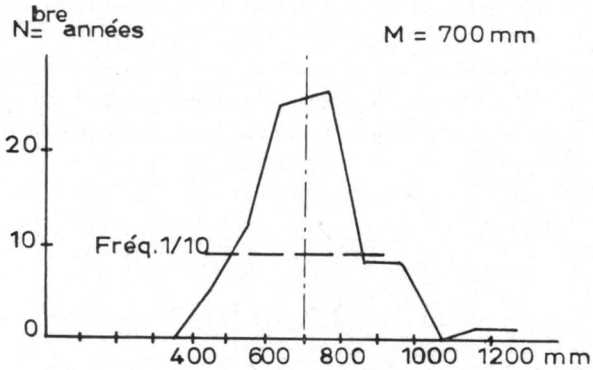


Fig. 4. — *Pluviométrie annuelle : répartition autour de la moyenne*

La répartition mensuelle des moyennes est assez homogène, avec un minimum de 50 mm en février et un maximum de 69 mm en octobre (fig. 5).

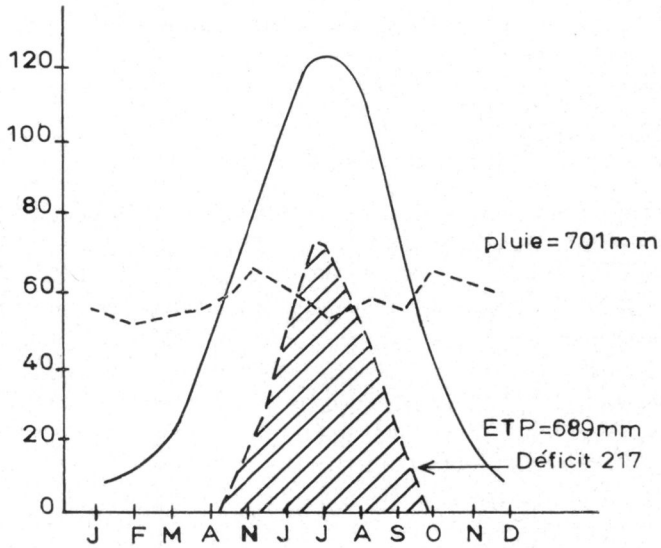


Fig. 5. — *Pluviométrie et Évapotranspiration potentielle (ETP Thornthwaite) ; moyennes mensuelles*

La distribution des différentes pluviométries mensuelles est par contre très variable : on trouvera schématisée en annexe, pour les différents mois de l'année, la fréquence des différentes moyennes au cours des 86 dernières années. Même en

éliminant les pluviométries « extrêmes » dont la fréquence est inférieure à 10 p. 100, on constate que les écarts maxima à la « moyenne » sont sensiblement égaux à cette moyenne, et la répartition est très étalée à l'intérieur de ces limites (10 et 100 mm).

L'examen de ces courbes met en outre en évidence :

1° La sécheresse fréquente des mois de février, mars (moins de 20 mm plus de un an sur 4) et avril (moins de 30 mm tous les 4 ans) ce qui, joint aux basses températures, explique les difficultés de la conduite de la fertilisation azotée et la lenteur du démarrage des blés d'hiver. Le cumul des 3 mois secs une même année est par contre exceptionnel. Les faibles pluviométries d'avril correspondent en outre à de longues périodes sans pluie (plus de 25 jours).

2° Les fortes pluviométries fréquentes des mois d'été et surtout d'automne : les pluviométries maxima correspondant à la fréquence de 10 p. 100 sont les suivantes :

pour juillet et août	100 mm
en septembre	110 mm
en octobre	140 mm
en novembre	120 mm

L'examen des pluviométries journalières est encore beaucoup plus significatif : si elles ne dépassent que très exceptionnellement 20 mm en hiver, elles peuvent atteindre 30 mm à partir de juin et les « trombes » de 40 à 45 mm en juillet, août ou septembre sont fréquentes (1 année sur 5). Ainsi s'expliquent les inondations d'été relativement importantes partout où les cours d'eau n'ont pas un bon écoulement (cas de la Claise). Les inondations d'automne sont provoquées par des pluviométries instantanées moins fortes mais au total très élevées et ce mois d'octobre souvent très pluvieux (plus de 140 mm tous les 10 ans et de 120 mm tous les 5 ans) gêne considérablement les semis de céréales d'hiver dans les sols peu perméables comme en Brenne.

Inversement les périodes de sécheresse prolongée sont très importantes : en été de juin à fin août on a, au moins une année sur deux, 3 à 4 semaines de suite sans la moindre goutte d'eau.

c) Déficits hydriques

Le degré hygrométrique

Le degré hygrométrique est très faible en été dans le Berry. Le mois le plus sec est le mois de juillet avec un degré hygrométrique moyen de 53 p. 100 dans l'après-midi, égal à celui de la Provence. Pratiquement, les minima peuvent être beaucoup plus bas et descendre en dessous de 30 p. 100.

On s'explique ainsi l'aridité du Berry, traduite par un déficit hydrique théorique qui peut être accusé.

Évapotranspiration potentielle

Moyennes.

A défaut de mesures locales, son évaluation par des formules diverses établies par voie statistique donne une approximation suffisante pour situer un comportement moyen.

Les données climatiques dont nous disposions pour un nombre suffisamment important d'années, ne nous ont permis que les calculs par la formule de THORNTWAITE (1948). La superposition des pluviométries mensuelles et des évapotranspirations potentielles (fig. 5) montre que le déficit moyen annuel à Châteauroux se situe entre avril et octobre et atteint 217 mm, le maximum mensuel se situant en juillet avec 70 mm.

Dans les années où nous disposons de données climatiques plus complètes (1945-1951), les évapotranspirations potentielles ont pu être calculées par les formules de BOUCHET (1959) et TURC (1961) : celle de BOUCHET accuse un déficit beaucoup plus accentué que les autres dans les mois les plus chauds (de l'ordre de 40 p. 100 en juillet), celles de TURC et THORNTWAITE se superposent sensiblement (voir en annexe). Nous ne disposons d'aucun élément permettant de juger de la valeur respective de ces formules dans le cadre du climat local.

Variabilité journalière.

Même si les valeurs BOUCHET sont trop élevées, elles restent comparatives entre elles, elles permettent seules des calculs à l'échelle de la journée et la sommation hebdomadaire. On peut voir en annexe que l'E T P peut tripler d'une semaine à l'autre en été ; ces variations brutales sont d'autant plus graves pour les plantes que les faibles réserves sont déjà épuisées à cette époque.

2. — Caractères spécifiques de la Brenne

Les données précédentes sont valables pour Châteauroux et la Champagne berrichonne. En Brenne, les relevés météorologiques existants sont trop incomplets pour permettre de caractériser le climat de façon précise.

Des observations systématiques au cours de nos études ont toutefois fait apparaître de façon purement qualitative quelques caractères spécifiques de la Brenne :

La pluviométrie est plus élevée dans le nord de la Brenne que dans le centre et le sud. Ce secteur plus arrosé correspond à l'ouest de la forêt de Lancosme.

La présence d'étangs provoque des brouillards denses qui disparaissent vers l'est sur le calcaire. Parallèlement, la fréquence et l'importance des rosées sont beaucoup plus élevées : les gelées de printemps s'en trouvent diminuées et les écarts journaliers de température en été sont plus accentués qu'en Champagne berrichonne.

Les étangs semblent donc constituer a priori autant de facteurs favorables à la diminution relative du déficit hydrique en Brenne.

3. — Conclusions et conséquences sur les cultures

La Brenne est une région sous dominance atlantique, du type océanique atténué. Malgré une bonne répartition mensuelle des pluies, elle est en fait soumise à un régime de pluies continues en automne et de sécheresse prolongée souvent dès la fin de l'hiver : le déficit hydrique peut accuser des pointes notables en avril et devient intense dès juin.

Les sols de Brenne, imperméables, sont donc gênés par l'eau dès le mois d'octobre ; les semis d'automne, toujours précoces pour cette raison, sont ou bien envahis

par le vulpin ou partiellement détruits par l'eau. Un mois de février sec est favorable au ressuyage des terres et aux semis de printemps qui, d'autres années, ne sont pas possibles avant mi-avril. De toutes façons, trois semaines continues de sécheresse intense en avril, mai ou juin arrivent toujours à stopper le développement d'une végétation mal implantée.

L'étude comparée des pointes d'évapotranspiration potentielle et des déficits de réserves hydriques dans les sols au cours du printemps et l'été doit expliquer un tel comportement (voir IIe partie).

V. — LE MILIEU AGRICOLE ET HUMAIN (1)

Les conditions économiques et humaines spécifiques de la Brenne font l'objet d'une autre étude, (S. PÉRIGAUD, (2). On ne trouvera donc résumés ici que quelques éléments nécessaires à la compréhension du problème général de la mise en valeur de cette région.

Comme on l'a vu dans les pages précédentes, les conditions naturelles rendent les sols de Brenne particulièrement difficiles à cultiver : ils sont donc naturellement peu exploités et la Brenne est le pays des landes et des étangs. Au Moyen Age, c'était surtout une grande forêt : elle a été en grande partie détruite par la pratique de l'écobuage et la coutume du bois mort. Actuellement, seule la forêt de Lancosme au N.-E. de la Brenne forme un massif boisé continu de 4 000 ha, taillis inextricable de rejets de chênes et de trembles, qui constitue surtout une réserve de cerfs, sangliers et faisans, encore livrée aux chasses à courre.

Ailleurs, la Brenne offre un paysage de désolation ; c'est un désert de rocs et de marais, royaume de la Brande, de la grande bruyère ou de la molinie, des joncs et des carex, à peine dominés par quelques chênes rabougris ou quelques saules. C'est le silence total seulement troublé par le coassement des grenouilles et le cri des mouettes. C'est le vide à perte de vue, d'où émergent ces « butons » de grès dans le « Sahara de la Brenne » et son célèbre château du Bouchet au-dessus de l'étang de la Mer Rouge.

Dans les secteurs moins défavorisés, c'est une immense étendue de pacages ras, timbrée de loin en loin de petits boqueteaux de chênes rachitiques, largement découpée en immenses parcelles de plusieurs hectares par des haies puissantes de saules et d'épines noires au-dessus d'un fossé d'écoulement depuis longtemps comblé.

La faible population — 15,4 habitants au km² est en légère baisse mais cette évolution n'a rien de comparable à celle de la plupart des campagnes françaises : La Brenne était encore au XVIIIe siècle le pays des miasmes et des fièvres, elle a toujours été très peu peuplée (19 hab./km² en 1830).

Dans ces conditions, les partages de propriété ont été insignifiants et le domaine agricole moyen de la Brenne couvre 80 ha d'un seul tenant : aucun problème de réaménagement foncier ne se pose ici.

(1) Les éléments fournis dans ce chapitre ont été fournis par la Direction des Services agricoles de l'Indre.
(2) En cours de rédaction.

La population groupée dans les quelques gros bourgs de Brenne ne trouve à peu près aucune utilisation sur le plan local dépourvu d'industrie ; elle cherche d'ailleurs plutôt une embauche sur Châteauroux.

Au total, il ne reste en moyenne, pour 100 ha de surface agricole utile, que trois travailleurs d'une productivité d'ailleurs très faible.

Dans ces conditions de travail du sol difficile et de nombre restreint de bras, l'exploitation extensive axée sur l'herbe est normale : les immenses étendues dégagées entre les landes sont des « prairies temporaires » transformées en paillassons de chiendent et de houlque laineuse dès les premières sécheresses. Les fourrages annuels tendent à compléter ces maigres ressources. Mais c'est la présence des étangs qui finalement, par l'entretien d'une végétation résistante de carex et de molinie à l'extrémité du pacage, permet la subsistance en été de troupeaux décharnés de Charollais nés sur la ferme. Les moutons se sont raréfiés par défaut de main-d'œuvre. Au total le chargement est très faible avec moins de une tête de gros bétail pour 2 ha de surface fourragère.

Autour des exploitations disséminées sur tout le territoire, quelques hectares de céréales sont semés sur des planches larges, souvent à peine bombées, qui ne réussissent pas à évacuer l'eau de ces pentes anarchiques et des bas fonds trop plats : les rendements dépendent en fait surtout de la pluviométrie de l'année, de 0 à 20 q. en blé d'hiver, de 10 à 30 q. en orge de printemps. On ne peut d'ailleurs préciser la rotation qui reste sous l'unique dépendance des aléas climatiques de l'année : tel semis d'automne détruit est retourné dès que l'entrée dans les champs devient possible en mars ou avril et remplacé par un semis de printemps trop tardif. Les plantes sarclées occupent une surface insignifiante. Les engrais sont évidemment employés avec parcimonie dans une région où les risques climatiques sont essentiels et la production brute atteint péniblement la moyenne de 35 à 40 000 anciens francs par ha de surface agricole dans les meilleures exploitations.

Aussi, bien que la structure foncière constitue une donnée favorable, la nature trop difficile fait que le propriétaire brennou n'est pas un cultivateur. La valeur vénale de la terre a été très faible, le quart de celle de la Champagne berrichonne. La terre de Brenne a donc constitué un pôle d'attraction pour les propriétaires fonciers (industriels ou professions libérales), soucieux surtout d'installer une demeure de plaisance au milieu de leurs chasses et de leurs pêches. Les rares cultivateurs « migrants » , non prévenus des difficultés d'exploitation du sol, se sont souvent ruinés. Les exploitants actuels sont surtout caractérisés par le fait qu'ils ne vivent pas exclusivement de l'agriculture : ils se partagent entre leur domaine et une autre activité, commerciale ou libérale, agricole ou politique, et croient être aidés par l'embauche d'un domestique choisi surtout pour ses faibles exigences en matière de salaire. Une intensification de la production se heurte donc non seulement à l'exploitation d'un « sol » particulièrement difficile, mais aussi à un cadre humain trop bien adapté à l'extensif.

A première vue, la mécanisation est le remède aux grandes surfaces dépourvues de main-d'œuvre : l'équipement a été assez intense en moyens de tractions au cours des dix dernières années, mais reste très insuffisant dans les autres domaines : les machines de récolte restent d'emploi difficile dans les terres labourées en petites planches ; les capitaux disponibles sont limités, les risques de suréquipement trop grands dans une région où les rentrées de fonds restent soumises aux conditions climatiques de l'année.

Les obstacles à la mise en valeur de la Brenne sont donc multiples : c'est la nature du sol lui-même qui est à l'origine des difficultés actuelles et c'est bien là le problème de base qu'il faut s'attacher à résoudre. Mais ces conditions d'exploitation pénibles ont formé un milieu humain incapable de se convertir seul, sans formation complémentaire et sans injection de nouveaux capitaux, à un système d'exploitation visant à une intensification de la production, au sens large du terme. Un investissement de l'État, limité à l'assainissement des terres, améliorera les conditions de travail et de vie des exploitants, mais ne sera pas « rentabilisé » si l'effort d'intensification est laissé à la bonne volonté et aux disponibilités financières des cultivateurs.

Seul l'aspect technique de la mise en valeur par drainage fait l'objet de notre étude. Mais il nous a paru nécessaire d'insister sur l'aspect économique de cet aménagement de territoire : son importance est telle que nos propres études seront sans objet et sans lendemain sur le plan régional si cette autre face du problème n'est pas résolue par ailleurs ; elles s'inscriront simplement au nombre des diverses « tentatives » de mise en valeur de la Brenne qui se succèdent en vain depuis le XVIIIe siècle.

VI. — LES TENTATIVES DE MISE EN VALEUR DE LA BRENNE (1)

Seules se trouvent précisées ici les données utiles à la compréhension de la situation actuelle : on trouvera en annexe III des détails complémentaires et des citations « in extenso ».

1. — La Brenne avant 1850

La Brenne fut longtemps le pays de la misère et des fièvres, avec une mortalité très élevée : Le mal en était surtout attribué aux étangs qui « entretenaient un air vicié » et la responsabilité aux moines, fondateurs, en 640, des abbayes de Saint Cyran et Méobecq et créateurs des premiers étangs dont « le produit était un moyen d'adoucir l'abstinence à laquelle ils s'étaient condamnés » (voir citation en annexe). Contamination des eaux, mauvaise alimentation, logements insalubres et inondés, état déplorables des chemins complétaient le tableau de misère.

En fait, cette région n'avait pas toujours été aussi insalubre : Saint-Cyran avait choisi pour retraite « un lieu très agréable et fertile, arrosé par le cours des eaux et très propre pour la chasse et où les rois allaient souvent prendre le plaisir (cité par PIOCH, Ing. Ponts et Chaussées 1846). Le roi Dagobert avait fait bâtir, en l'an 842, l'église de Méobecq et un monastère ; il avait cédé aux religieux tous ses droits depuis le cours de l'Indre jusqu'à la Creuse et ce fut « l'abbaye de Saint-Cyran en Braine ». (Histoire du Berry par Gaspard THAUMAS de la THAUMASSIÈRE — Bourges M. D. C. IXC.)

(1) Les éléments ayant servi de base à la rédaction de ce chapitre ont été fournis par les Archives départementales de l'Indre pour toute la partie historique et par le Service du Génie rural de l'Indre pour la période actuelle.

Au XIIe siècle, Subtray et Mézières étaient les résidences de deux « Jeanne de Braine » qui possédaient pourtant d'autres terres en Touraine, sur le Cher et sur la Loire. Jusqu'à la fin du XVIe siècle le château de Mézières était encore la résidence de la descendance d'un frère du roi de Naples.

Sans préjuger du niveau de vie des paysans à cette époque, il est peu probable pourtant que la Brenne ait été choisie comme lieu de séjour au milieu des fièvres et des calamités telles qu'elles étaient décrites au début du XIXe siècle.

Il semble bien que l'insalubrité de la Brenne ait considérablement augmenté en deux ou trois siècles : les premiers efforts d'analyse de la situation, semblent rendre surtout l'homme responsable de cet état de fait, depuis les moines qui ont créé les étangs, le paysan qui vit de l'écobuage de la lande jusqu'aux premiers industriels des forges qui dévastèrent les anciennes belles forêts et créèrent les moulins entravant, par des barrages, le libre écoulement des eaux : l'ouverture des pelles de fond provoquaient de brutales inondations, véritables raz de marée qui, en quelques heures, pouvaient entraîner les récoltes, pénétrer dans les maisons et laisser sur place un limon fétide. (Voir en annexe procès-verbal de séance du Conseil général de l'Indre 1843.)

Quant à l'agriculture, si elle était en 1850 particulièrement arriérée, c'était surtout par « faute d'argent et de bras » : quelques secteurs restaient florissants là où des propriétaires plus fortunés et plus compétents imposaient des méthodes nouvelles ; PIOCH a signalé les très belles prairies du Bouchet (dans le « Sahara » actuel de la Brenne), des artificielles à Martizay, Vendœuvres et Luant, de beaux colzas et chanvres un peu « partout où un peu de soin est apporté », de belles récoltes de céréales (rendement 10 grains pour 1) où les premiers labours en planches étaient introduits (métairies de Migné, Rosnay). Quelques irrigations furent faites près de Mézières à partir de la Claise et entre Vendœuvres et Méobecq à partir du grand étang des Vigneaux : « Partout les résultats sont satisfaisants en proportion du travail et des engrais qu'ils ont coûtés » lit-on dans ce rapport de 1846.

Autrement dit, on trouve exprimés dès 1850 les mêmes obstacles qu'aujourd'hui à une vie agricole normale : défaut de capitaux et défaut de main-d'œuvre (en nombre et compétence).

Mais la non-survivance des belles réalisations décrites ci-dessus montre aussi que les réussites dépendent d'un équilibre toujours précaire, facilement et rapidement rompu dès que l'effort cesse. Si l'homme est en partie responsable de l'état actuel de la Brenne, le degré de dégradation est tel que la reconstitution des sols est lente, difficile et toujours soumise à une nouvelle « rechute ».

Et c'est à une série d'efforts suivis de retours à la situation antérieure que l'on assiste depuis près de deux siècles : l'analyse de la situation se précise toutefois peu à peu, les causes d'échec sont progressivement éliminées et si la Brenne était en 1955 le parent pauvre de l'Indre au milieu des régions voisines beaucoup plus riches, sa situation n'était déjà plus comparable à celle d'autrefois, ni même à celle actuelle de certains pays de montagne.

2. — Les premières tentatives de mise en valeur

La mise en valeur de la Brenne est apparue très tôt comme devant relever de la collectivité, dépassant nettement les possibilités du particulier.

Les premières tentatives remontent au lendemain de la Révolution (voir annexe).

Mais, s'attaquant uniquement aux étangs, techniquement mal comprises et arbitraires, elles étaient vouées à l'échec dès le départ. Cependant les premiers desséchements imposés imprimèrent une impulsion qui aboutit rapidement à une baisse de mortalité.

Cinquante ans plus tard (1840-1850) des études sérieuses étaient entreprises au niveau départemental par le Service des Ponts et Chaussées ; c'est l'origine des projets hydrauliques de régularisation des cours d'eau et même d'un projet de création de canal à fonction multiple (transport — assainissement — irrigation), digne des grands aménagements régionaux actuels. En l'absence de soutien financier de la part de l'État, il n'y eut aucune réalisation. Mais toutes ces études avaient au moins servi à montrer que la difficulté du problème hydraulique au niveau des émissaires était beaucoup moins technique qu'administrative et juridique ; elles soulignèrent la nécessité d'une réglementation des usines et des niveaux d'étangs, d'une intervention du législateur et d'un financement des travaux par l'État.

3. — Les grands travaux du Second Empire

Les grands travaux d'aménagement furent entrepris au second Empire : on en trouvera tous les détails en annexe. Ils ont porté sur différents domaines :

— curage et aménagement de la Claise et des principales rivières,

— créations de 224 km de routes,

— subventions importantes pour constructions de points d'eau potable, défriches de landes et reboisements par résineux,

— le problème des étangs, plus épineux, n'a été que partiellement réglé, par des séries de mesures particulières (voir en annexe).

Ces travaux ont permis de donner un essort important et de transformer complètement la région. Les améliorations se sont poursuivies dans tous les domaines jusqu'à la première guerre mondiale ; la culture des céréales, les prairies artificielles gagnèrent sur les landes et les étangs, le cheptel s'améliora, les fermes se reconstruisirent et l'état sanitaire devint aussi bon qu'ailleurs. Parallèlement le problème de la réglementation des usines tomba de lui-même lorsque les unes après les autres elles cessèrent toute activité par épuisement du minerai, et rachat par Commentry.

Mais progressivement la situation s'est détériorée : l'organisation de 1853 portait déjà en elle ses germes d'échec dans un pays où l'équilibre atteint restait précaire, conditionné par l'entretien des réalisations. Les Syndicats des cours d'eau ne groupaient chacun que 30 à 70 propriétaires n'intéressant que 80 à 230 ha. Ces surfaces étaient relativement limitées, trop faibles pour la totalité à assainir efficacement. D'autre part, comme on l'avait bien montré déjà, il ne suffisait pas de curer les cours d'eau, il fallait ensuite les entretenir. Les décrets de création et d'organisation des cinq Syndicats prévoyaient bien le rythme de l'entretien à respecter, mais la charge en revenait aux riverains, seuls intéressés. Pratiquement, dès la première année, les riverains ont opposé une force d'inertie toute berrichonne aux efforts de l'Administration. Celle-ci a cherché à retirer au particulier ces obligations et les Syndicats prirent la décision en 1860 de faire exécuter ces travaux à l'entreprise par adjudication. Mais les ressources de ces Associations trop petites étaient trop modestes :

l'entretien annuel n'a pas été assuré et l'ensablement progressif a recréé les difficultés d'écoulement sur les propriétés privées.

L'évolution générale de la main-d'œuvre agricole a considérablement affecté cette région de grandes exploitations et à l'ensemble des rivières s'est superposé le comblement des fossés particuliers.

Parallèlement les gens nés en Brenne ont fini par quitter cette région décidément trop difficile et de nombreuses propriétés ont été rachetées pour constituer souvent des réserves de chasse ; le remplacement partiel du paysan par des propriétaires fonciers non agriculteurs accéléra le mouvement de décadence.

La surface totale des étangs et des terres incultes est finalement redevenue au lendemain de la première guerre mondiale à peu près ce qu'elle était avant tous les grands travaux. Il en resta pourtant une amélioration définitive de l'état sanitaire et du niveau de vie général.

Il s'en est dégagé aussi une notion fructueuse pour l'avenir, bien spécifique de la Brenne : la nécessité absolue de prévoir au niveau collectif, l'entretien immédiat et permanent des améliorations obtenues si l'on désire qu'elles soient durables.

4. — Les efforts actuels de mise en valeur de la Brenne

ORIGINE.

En 1938, un nouveau projet d'aménagement de la Claise a pris jour, subordonnant l'exécution des travaux à la création préalable de taxes d'entretien massives. La deuxième guerre mondiale a stoppé toute activité pendant encore plus de 15 ans.

Dans les années qui ont suivi 1950 un nouvel effort pour sortir la Brenne de son niveau particulièrement bas s'est amorcé. Ce mouvement est venu des agriculteurs eux-mêmes, des migrants originaires du Nord, de Belgique, de Pologne, où ils avaient vu et pratiqué les techniques d'assainissement. Dans une région où la propriété est grande et la main-d'œuvre réduite, il est bien évident que le premier pas à franchir est la diminution des charges de travail à l'hectare cultivé et corrélativement le le développement de la mécanisation. Ces agriculteurs du Nord, transplantés dans ce nouveau cadre, saisirent rapidement la nécessité absolue et vitale pour eux d'adopter un système de culture compatible avec ces données. Dans leur esprit le recours aux planches ne peut pas constituer la solution d'avenir, puisqu'elles exigent un entretien constant des dérayures dans la parcelle et de fossés à l'extérieur ; elles constituent un obstacle évident à l'emploi des moissonneuses-batteuses et des moyens mécaniques de récolte des fourrages. Le relief très anarchique à très petite échelle, souvent même inexistant, enlève aussi toute efficacité à un modelé réalisé avec les moyens limités du cultivateur.

Seul le drainage permet théoriquement de résoudre toutes ces difficultés : les tuyaux de poterie posés après étude topographique détaillée arrivent à se jouer du relief, permettent le labour facile à plat et l'emploi sans ennui de toutes les machines ; il permet au cultivateur de travailler ses sols normalement et le dispense de façons supplémentaires spécifiques des sols mouillés. Il résoud de façon élégante, en le supprimant, le problème ardu de l'entretien des ouvrages au niveau du particulier.

Bases administratives

L'initiative actuelle vient donc d'un agriculteur : les premières expériences sommaires de drainage par tuyaux de poterie à très grand écartement ont été entreprises en 1954, par un propriétaire de la commune de Ciron ; l'émissaire final étant la Creuse, il ne se posait aucun problème d'évacuation collective des eaux. Mais ce cas particulier n'est pas généralisable en Brenne où les travaux au niveau de la parcelle sont à compléter par un aménagement hydraulique d'ensemble, durable dans l'avenir.

En 1955, sous l'impulsion du Service du Génie rural, une première Association syndicale de Drainage se constituait à Ciron, elle constatait l'impossibilité d'entreprendre des travaux d'assainissement en Brenne, dans le cadre juridique qui avait démontré ses faiblesses au XIXe siècle ; l'expérience avait suffisamment montré que le maintien en bon état des ouvrages ne peut être laissé aux agriculteurs et que l'imposition des taxes est utopique. Ce fut l'origine d'un « Syndicat intercommunal » financé par des centimes additionnels selon les règles administrativement définies ; c'est ce syndicat qui prendra en charge, avec l'aide de l'État, les travaux sur les émissaires généraux, la création de fossés secondaires et tertiaires et leur entretien annuel ultérieur.

Bases techniques

Si l'aspect administratif et juridique paraît réglé de façon viable cette fois, le problème technique est beaucoup plus difficile à poser.

Pour qui se promène pour la première fois en Brenne, il saute aux yeux que tout n'est pas récupérable pour l'agriculture ; le premier rapport de l'Ingénieur en Chef du Génie rural de 1956 citait comme ordre de grandeur 15 000 hectares susceptibles d'être rendus par le drainage cultivables dans des conditions normales.

— *Les étangs* semblent devoir continuer à rester l'attrait du centre Brenne. Mais une amélioration de leur rapport pourrait être obtenu par le démottage, le faucardage, la pêche annuelle et surtout l'assec périodique avec ou sans culture et l'entretien d'un fossé d'évacuation des eaux aux points bas. Un gros effort a déjà été fait pour la production de carpe sélectionnée (carpe cuir et miroir), mais le problème de commercialisation du poisson d'eau douce dépasse le cadre local.

— *Le reboisement* semble poser les mêmes difficultés que la culture : nécessité d'assainissement des sols par des fossés qui ne tiennent pas, présence fréquente du grès à trop faible profondeur. Les semis de pins maritimes donnent de bons résultats lorsque le sol est convenablement préparé et à la condition d'être protégés du lapin par un engrillagement coûteux. Le reboisement semble devoir être lié à la création de réserves de chasse.

— *Le tourisme* pourrait être developpé dans une région aussi originale et aussi tranchée que la Brenne et constituer une ressource complémentaire non négligeable.

Aussi la mise en valeur de la Brenne, partie du désir d'un cultivateur de pouvoir cultiver ses terres comme ses ancêtres du Nord est devenue rapidement l'objet d'études importantes dans le cadre d'une collaboration très étroite entre les Services du ministère de l'Agriculture, le département de l'Indre et les agriculteurs eux-mêmes.

Le Service du Génie rural, responsable de l'hydraulique, entreprenait en 1956

quelques drainages dans le cadre des deux Associations syndicales récemment créées de Ciron au sud et Mézières-en-Brenne au nord, sur des parcelles où aucun aménagement général d'émissaire n'était nécessaire. Les travaux, tout en créant un climat psychologique favorable, avaient surtout pour but de tester sous tous ces aspects la technique du drainage en Brenne.

Parallèlement le Génie rural demandait le concours de l'I. N. R. A. pour lui définir les « zones récupérables ». L'accord intervenu entre les deux services doit permettre de préciser en outre les conditions techniques optima d'exploitation.

La question posée est suffisamment vaste pour faciliter une grande souplesse dans la conception du travail et une adaptation progressive des méthodes aux premiers résultats obtenus.

VII. — CONCLUSIONS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

1. — Le problème de la mise en valeur de la Brenne

La Brenne est une région naturelle à caractère tranché très spécifique, déshéritée par la nature de ses sols imperméables à faible profondeur et l'absence totale de réseau hydrographique organisé. Ennoyé l'hiver, très sec l'été, c'est le royaume des étangs à bords marécageux, et des immenses étendues de landes à callunes. Ce fut longtemps le pays de la désolation et des fièvres.

Des documents historiques révèlent pourtant que la Brenne connut des siècles florissants : ses sols étaient simplement prédisposés à une dégradation intense et rapide, effectivement provoquée par une déforestation systématique, par la création anarchique d'étangs artificiels sans niveau maximum défini, par l'utilisation industrielle, arbitraire et abusive des cours d'eau.

Divers efforts de redressement ont été tentés depuis la Révolution. Seuls les grands travaux du second Empire ont permis à la Brenne de sortir de son marasme et d'acquérir définitivement un niveau sanitaire normal. Mais la détérioration partielle et progressive des résultats obtenus a mis en évidence l'équilibre toujours précaire des améliorations obtenues, immédiatement subordonné à l'entretien permanent des aménagements conçus pour l'évacuation des eaux. Cette nécessité d'un entretien constant est la loi fondamentale à respecter en Brenne où la nature, dans l'état actuel de ses sols, tend à une dégradation toujours plus poussée et auto-accélérée.

Ces conditions naturelles difficiles ont fait de la Brenne une région qui a toujours été peu peuplée. Les exploitations agricoles, axées sur un type d'élevage très extensif sont grandes et d'un seul tenant. La structure foncière est donc actuellement favorable, à la condition toutefois qu'une mécanisation poussée remplace une main-d'œuvre peu nombreuse.

Cette forme d'intensification par la machine exige un assainissement préalable des terres. Mais en Brenne, plus qu'ailleurs, les techniques d'assainissement doivent permettre de limiter au minimum l'intervention du particulier dans l'entretien

indispensable des fossés. Elles doivent aussi faciliter l'emploi de la machine sans souci et risque constant de casse de matériel.

C'est avec cette optique que quelques cultivateurs d'origine flamande ont condamné la technique traditionnelle des labours en mauvaises planches ; ils ont drainé leurs sols avec des drains en poterie, mis leurs terrains à plat et obtenu ainsi des résultats remarquables, moins en rendements d'ailleurs qu'en régularité dans ces rendements et en facilité de travail.

Ce sont ces initiatives individuelles que le Service du Génie rural s'est chargé de coordonner dès 1957 dans le cadre d'un plan d'aménagement de la région.

Dès le départ, avant même le moindre avant-projet, la durabilité des travaux à entreprendre a été garantie par la création d'un syndicat intercommunal, provisoire pour la durée des études, administrativement et financièrement chargé d'assurer l'entretien de tous les ouvrages à intérêt collectif, ce qui comprend les exutoires à la sortie des parcelles. Au niveau de l'exploitant la constitution d'Associations syndicales de drainage permet un financement spécial des travaux particuliers et assure leur réalisation correcte par les soins de techniciens du drainage.

Sur la plan agronomique, la mise en valeur de la Brenne pose à l'I. N. R. A. deux sortes de problèmes à résoudre : le premier est un aspect a priori banal de cartographie appliquée, destinée à situer et à évaluer les surfaces cultivables sur les différents bassins versants des émissaires actuels, dont le cours est à aménager ; cette cartographie doit apporter la base économique des études d'hydraulique générale relevant du Service du Génie rural.

Le deuxième problème est essentiellement agronomique : il cherche à préciser les possibilités culturales de sols exploités jusqu'alors très extensivement et de mettre au point les conditions techniques d'une intensification de leur production.

Pratiquement ces problèmes, simples à poser, sont complexes à résoudre : l'installation de tuyaux de drainage peut provoquer une véritable révolution dans la vie du sol ; ce n'est pas un état des lieux actuels qu'il est utile de définir, mais un potentiel à venir, souvent à créer, étroitement lié, pour chaque type de sol, aux conditions de cultures imposées. L'interprétation de la cartographie devient étroitement subordonnée à cette évolution du comportement des sols.

2. — Méthodes d'étude adoptées

L'aperçu géologique qui a été donné rapidement en première partie laisse prévoir l'extrême hétérogénéité des sols de Brenne, constituée par des dépôts de granulométrie variable, remaniés souvent par l'érosion. Une première prospection sommaire sur l'ensemble de la Brenne a confirmé la première impression de très grande complexité aussi bien à l'échelle de la parcelle que dans l'ensemble d'un petit bassin versant et la difficulté de trouver une relation simple et systématique entre la morphologie du profil et le cadre topographique immédiat.

La cartographie générale nécessaire au Service du Génie rural s'est donc trouvée en un premier temps volontairement limitée au bassin versant de la Claise, premier émissaire susceptible d'être aménagé qui, par son cours entravé ennoie un secteur à première vue mieux cultivable que la Brenne centrale. Cette cartographie s'est

bornée à traduire schématiquement les descriptions morphologiques détaillées des profils, autrement dit à fournir un état des lieux actuels du sol.

Un gros effort a été porté parallèlement dans le cadre des associations syndicales de drainage sur des secteurs bien définis de 3 à 50 ha, dispersés sur l'ensemble de la Brenne et comprenant sensiblement tous les types de profils. La figure 41 à la fin de cette étude montre la répartition des 2 milliers d'ha ainsi bien étudiés, depuis le chantier de drainage lui-même qui offre, avec sa multitude de tranchées, une vue synthétique des différents profils, jusqu'aux résultats culturaux obtenus sous contrôle permanent du comportement du sol dans son évolution au cours des années qui suivent ce drainage. Ce sont ces études menées sur terrain drainé, dans le cadre d'une expérimentation culturale mise ultérieurement en place, qui constituent la base d'interprétation de la cartographie, finalement destinée à traduire les possibilités culturales des différents sols de Brenne.

DEUXIÈME PARTIE

LES SOLS DE BRENNE. APERÇU PÉDOLOGIQUE.

I. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES PROFILS DE BRENNE

Certains caractères sont communs à tous les sols de Brenne : ils les distinguent des régions naturelles voisines, bien qu'ils puissent en fait être observés ailleurs en France. Le noyau central par contre présente un aspect bien spécifique et propre à la Brenne.

Dans cet ensemble, des nuances sensibles d'un point à un autre, permettent de distinguer des « types » de sols différents. Mais une hétérogénéité extrême à l'échelle de la parcelle reste la loi générale.

Ces différents points sont précisés dans les pages qui viennent.

A. Caractères communs à tous les profils de Brenne

1. — La couleur

Le profil de Brenne présente toujours immédiatement au-dessous de la couche superficielle humifère, un horizon nettement et brutalement différencié, plus ou moins décoloré, allant du blanc crème uniforme, à une teinte ocre, tranchée par son aspect marbré. Dans la masse, quelques nodules ferromanganiques durs et foncés apparaissent de loin en loin.

2. — La structure

Cet horizon présente une structure cimentée, compacte, quels que soient sa granulométrie et son taux d'argile.

3. — Le type d'enracinement

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un « critère » pédologique, le type d'enracinement mérite d'être signalé dès maintenant : il constitue un caractère essentiel. Quelle que soit l'espèce cultivée, le profil radiculaire reflète des difficultés de pénétration dans cet horizon décoloré : abondamment développées dans la couche labourée et multipliées dans un plan horizontal à la limite de cet horizon, les racines ne le traversent

finalement que de façon sporadique, droites et nues, en suivant les passages plus faciles d'anciennes racines ou de rares trous de vers. C'est en dessous de cet « horizon-obstacle » que les quelques racines pénétrées recommencent à émettre des radicelles.

L'examen détaillé de ces racines dans la couche labourée révèle, par la présence de gaines de rouille autour d'elles, que le milieu est réducteur à certaines périodes de l'année : l'ennoyage des terres en hiver est en effet systématique comme on l'a vu ; mais le gley se forme également par les étés humides.

Ces trois points sont absolument systématiques, quelle que soit la nature exacte de la roche-mère elle-même : on peut les retrouver même en dehors des dépôts éocènes de la Brenne proprement dite. Ce sont en fait des caractères liés à l'hydromorphie temporaire décrits ailleurs, surtout sous forêts (DUCHAUFOUR, 1960, PLAISANCE, 1956-1960, etc.). La Brenne présente simplement le caractère fondamental de voir poussés à l'extrême de tels aspects sur une surface importante de la dimension d'une région naturelle.

B. — Caractères spécifiques de la Brenne centrale

Le caractère spécifique des dépôts détritiques de transport, c'est-à-dire de la véritable Brenne dans l'acceptation locale du terme, est la présence systématique de grès à profondeur variable mais peu importante, comprise entre 0 et sensiblement — 0,80 m.

Ce grès est extrêmement dur lorsqu'il présente l'aspect de sols rouges tropicaux, c'est lui qui donne le relief à butons déjà évoqué. Mais, en dehors de la zone anticlinale, c'est un grès argileux veiné d'ocre, de rose, de mauve et de rouge où l'on retrouve la trace des anciens enracinements forestiers. Au-dessus de lui, il n'y a pas de limite nette entre « l'arène gréseuse » qui se délite à l'air en quelques jours et un banc argileux plus ou moins épais, de même teinte ocre marmorisée, très grossièrement structuré : les mottes extrêmement compactes apparaissent découpées en gros cubes de 10 à 12 cm, extérieurement tapissés d'un feutrage violacé de vieilles racines, témoin bien conservé de la végétation naturelle des anciennes Brandes.

Cette argile est si sèche qu'elle est très dure et considérée pratiquement dans la région comme un « grès en formation » par similitude au « grès en décomposition » de l'arène : nous reviendrons sur cette notion dans le paragraphe final consacré à l'interprétation pédologique.

C. — Les critères de différenciation entre les sols

Des nuances sensibles existent d'un sol à l'autre, subordonnées aux différences de profondeur et de granulométrie, accessoirement de topographie. Ces points sont simplement évoqués ici, destinés à servir de cadre aux développements plus détaillés qui suivront :

1. — PROFONDEUR

Ce point ne mérite pas de précision particulière : ses conséquences sont évidentes sur l'aspect du profil lui-même et le comportement actuel des plantes.

2. — Granulométrie

Depuis l'argile jusqu'au sable pur, le sable très grossier caillouteux ou le sable fin limoneux et leurs mélanges en toutes proportions, toute la gamme de granulométries possibles se rencontre en Brenne.

Ici, il s'agit de dépôts différents qui se sont superposés, là d'un profil en place ; ici un sol jeune relativement homogène, là un sol remanié ou profondément dégradé.

3. — Position topographique

Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une caractéristique du sol lui-même, mais d'une corrélation entre sa position et son type d'évolution. Si la micro-hétérogénéité du substrat imperméable est à l'origine d'une hydromorphie temporaire généralisée, les possibilités variables d'écoulement de l'eau en surface créent des zones préférencielles d'ennoyage partout où le relief permet une stagnation de l'eau ; sur les surfaces apparemment planes la moindre discontinuité accuse les caractères d'hydromorphie. Dans les bas de pente et les thalwegs, l'accumulation d'éléments fins se superpose à l'hydromorphie d'origine externe pour former un « type de sol très spécifique et systématique.

D. — L'hétérogénéité

Les chapitres précédents ont laissé entrevoir la complexité des sols de Brenne. Quelques exemples illustrent ci-dessous cette hétérogénéité à l'échelle de la parcelle.

Bien que les méthodes d'analyse utilisées soient précisées plus loin, quelques données classiques sont présentées dès maintenant : elles complètent les descriptions présentes et allègent l'étude générale ultérieure.

1. — La Claise (lieu-dit)

(Sud-est de la commune de Mézières, à la pointe nord de l'étang des Vigneaux : nord de la pleine Brenne caractérisée par son relief faible, région d'étangs.)

On se trouve ici dans un secteur relativement homogène quant au dépôt d'origine, caractérisé par un tri très poussé des éléments sableux autour des dimensions relativement faibles : la courbe granulométrique présente une pointe accusée entre 200 et 400 μ (voir plus loin courbe n° 605 — fig. 9 p. 164). Les profils sont « lessivés », mais l'importance de l'argile est très variable en profondeur. L'ensemble repose sur des éléments beaucoup plus grossiers et plus ou moins consolidés en grès friable peu coloré.

L'exemple choisi est celui d'une parcelle triangulaire de 15 hectares encadrée d'étangs et bien représentative de la région par son microrelief tourmenté, comme le montre le levé topographique ci-dessous (figure 6). La coupe A. B. traduit ce relief et met en évidence trois secteurs *a*, *b* et *c* auxquels correspondent trois types de sols

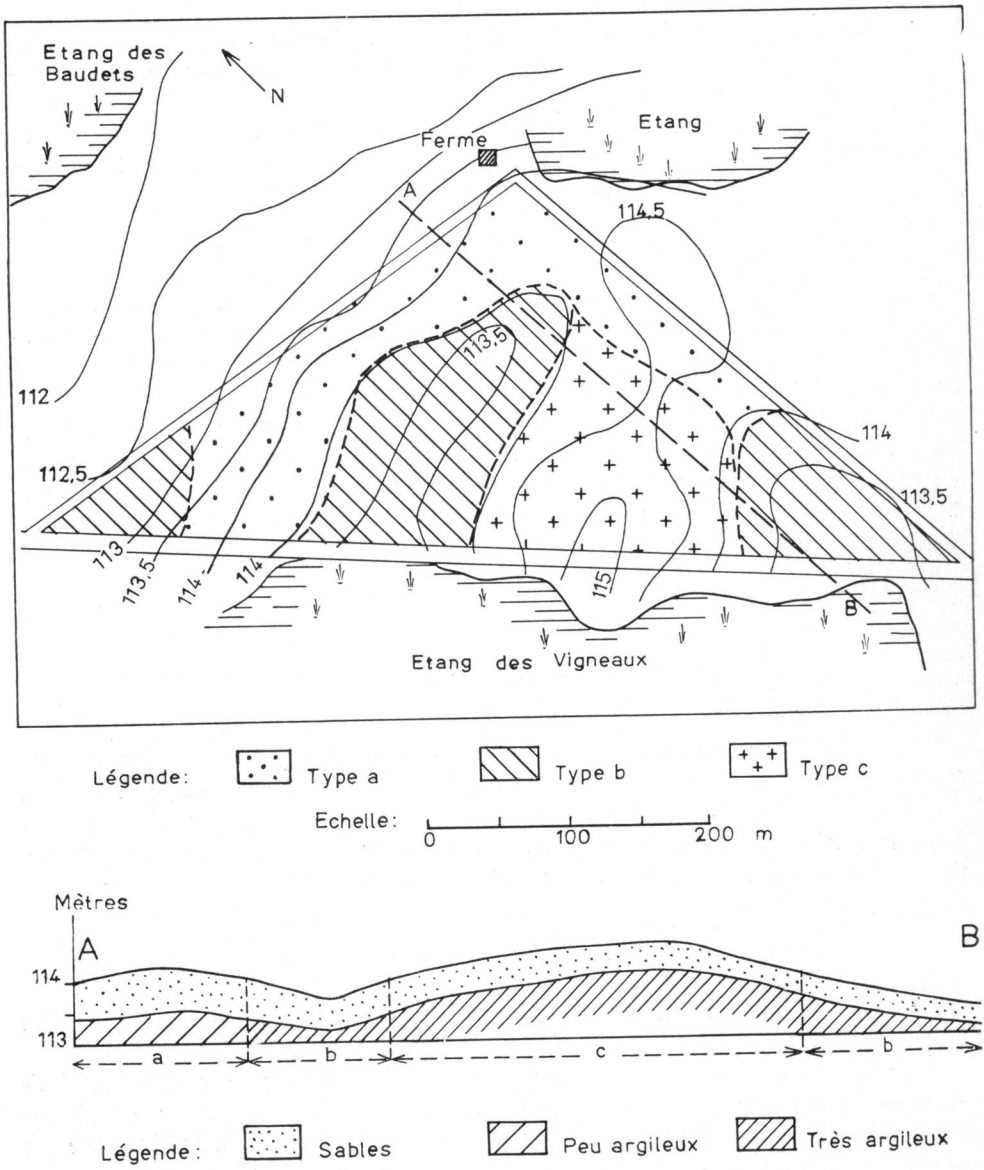


FIG. 6. — « *La Claise* » (*lieu-dit*)

En haut : plan ; les différents types de sols et courbes de niveau
En bas : coupe AB.

différents issus du même dépôt de sables triés relativement fins mentionnés ci-dessus. Le tableau I en donne les caractéristiques, les plages de sols correspondantes sont reportées en planimétrie sur la figure 6.

TABLEAU I

Les trois « types » de sols à Claise

	Secteur *a*	Secteur *b*	Secteur *c*
Horizon humifié			
Épaisseur	20 à 25	25 à 30	25 à 30
Argile %	5	6	6
Limons + sables très fins %	10	20	24
Matière organique %	1,1	1,8 à 3,0 suivant ennoyage	1,9
C/N	12	16	16,2
Horizon A_1 ou A_2			
Profondeur	— 20 à — 70	— 25 à — 60	— 25 à — 50
Argile	5	6	6
Couleur	variable ou ocre foncé ou crème + nodule fer	blanchi	très blanc
Structure	meuble (1) à assez compact (2)	très compact	très compact
Horizon B			
Profondeur	— 70 à — 90	— 60 à — 120	— 50 à — 105
Argile	8 %	35 %	28 à 50 % (3)

(1) Structure particulaire, meuble où la teinte est ocre foncé (sol brun lessivé sans caractère d'hydromorphie
(2) Structure pelliculaire à tendance cimentée où l'horizon est décoloré (traces d'hydromorphie).
(3) La teneur en argile varie très progressivement de 28 à 40 p. 100 dans un sens transversal à la coupe A. B.

— Le type *b* correspond pratiquement aux thalwegs. Ceux du centre et de la pointe sud-est sont souvent envahis par les eaux de l'étang des Vigneaux qui passent sous la route elle-même. Dans la pointe sud-ouest, l'affleurement de l'argile se fait à un niveau très variable, entre — 20 et — 70 cm. Quoi qu'il en soit, ces thalwegs sont caractérisés par un colluvionnement net avec enrichissement en limons et matière organique plus noire qu'ailleurs, à rapport C/N élevé.

— Le type *c* qui correspond à la butte la plus haute de tous les environs a pratiquement les mêmes caractéristiques analytiques ; le caractère d'hydromorphie y est poussé à l'extrême.

— Le type *a*, présente en fait des nuances très sensibles d'un mètre à l'autre ; ici profil sain, là profil hydromorphe : ces variations se traduisent par des aspects différents du profil, mais aussi des comportements végétaux différents.

De l'autre côté de la route et à l'est de l'étang des Vigneaux, la granulométrie est différente : les sables sont triés vers une dimension plus grande : 500-800 μ (voir analyse n° 925 plus loin). Dans la zone la plus basse, ces sables sont recouverts d'un dépôt plus argileux, non trié, assez souvent rencontré en bordure des étangs (profil n° 68 de la figure 14).

2. — Les terres de Brandes (lieu-dit)

(nord de la commune de Ciron, centre-sud de la Brenne).

La pente se trouve ici régulière au-dessus d'un d'étang.

Sur la moitié est de cette parcelle de huit hectares l'embase est un grès classique de Brenne, à grain assez gros et marbrures ocre foncé à rouge suivant les endroits. Comme on le voit sur le plan (figure 7) et la coupe (A. B.), le niveau d'affleurement

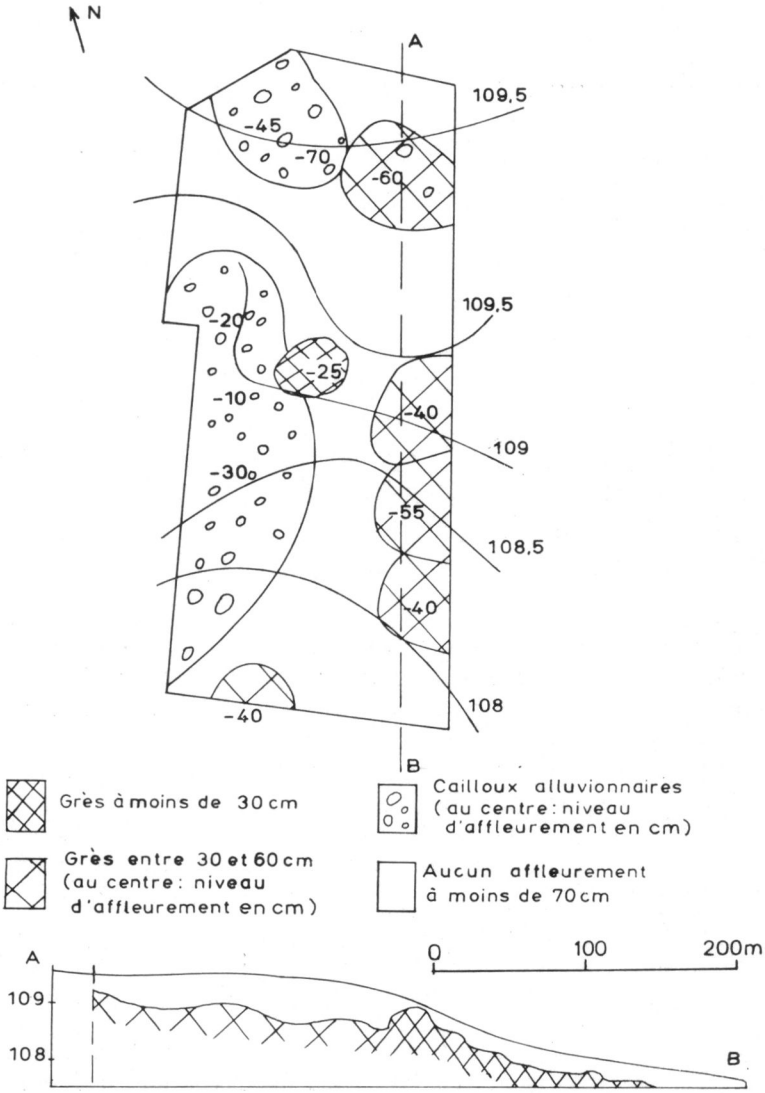


Fig. 7. — « *Les Brandes* » (*lieu-dit*)

En haut : plan ; affleurements et courbes de niveau,
En bas : coupe AB.

est très variable, minimum au centre (— 25) à la rupture de pente (mais sur quelques mètres carrés seulement). Les sols profonds (pas de grès à — 70 cm) sont également répartis partout, peut-être un peu plus importants dans la moitié haute.

Sur la moitié ouest on ne trouve plus de grès, mais des cailloux alluvionnaires sous forme d'inclusions à des profondeurs variables, meubles lorsqu'ils ne sont pas profonds (Centre et Sud), véritables pouddingues très durs ailleurs (Nord).

Schématiquement sur l'ensemble de la parcelle, les sols se trouvent de deux types :

1. — Dans le Centre-Ouest, profils de sables caillouteux peu argileux.

2. — Partout ailleurs, recouvrant le grès ou les pouddingues, dépôt fin limoneux ayant donné naissance à des sols lessivés hydromorphes.

Le profil type est représenté par le numéro 14 (figure 11 et tableau 12), plus argileux dans le bas que dans le haut, avec progression assez régulière le long de la pente.

Le tableau 2 ci-dessous donne les principaux chiffres d'analyse de deux profils issus de même dépôt fin, l'un vers le bas, l'autre au sommet :

TABLEAU 2

Terres de brandes (lieu dit)

	Haut de pente	Bas de pente
Horizon		
A_l — profondeur	0-15	0-25
Argile %	12	20
Limon + sables très fins %	45	55
Matière organique %	3,1	3,35
C/N	15,6	15,4
pH	5,5	6,3
A_1 — profondeur	15-40	25-40
Argile %	38	39,0
B — Argile %	49	55,0

Comme on le reverra par la suite, le lessivage latéral se traduit par un enrichissement en argile et éléments fins non colloïdaux, mais également en éléments métalliques (différence de pH, avec taux de saturation de 90 à 100 p. 100 en bas, de 50 p. 100 en haut). Le rapport C/N par contre est élevé partout, même au sommet.

3. — Tournavaux

(sud de la commune de Migné — plein centre Brenne).

Des profils étudiés le long d'une ligne de pente ont révélé en plein centre Brenne l'existence de véritables mosaïques de sols. Seuls quelques types ont été retenus ici :

Bas de pente : profil type n° 39 (figure 15), profond assez argileux, sables peu triés, hydromorphie accentuée avec accumulation ferromanganique de — 15 à — 25.

Haut de pente : sol très sableux en surface (8 p. 100 d'argile), enrichi progressivement en argile (28 p. 100 à — 20 cm ; 49 p. 100 à — 40), grès argileux en arène à — 70, hydromorphie accentuée.

Dans la pente : sols de profondeur variable, du même type pédologique que le précédent en plus ou moins argileux ; par places, poches d'argile compacte marmorisée ocre dépourvue de sables.

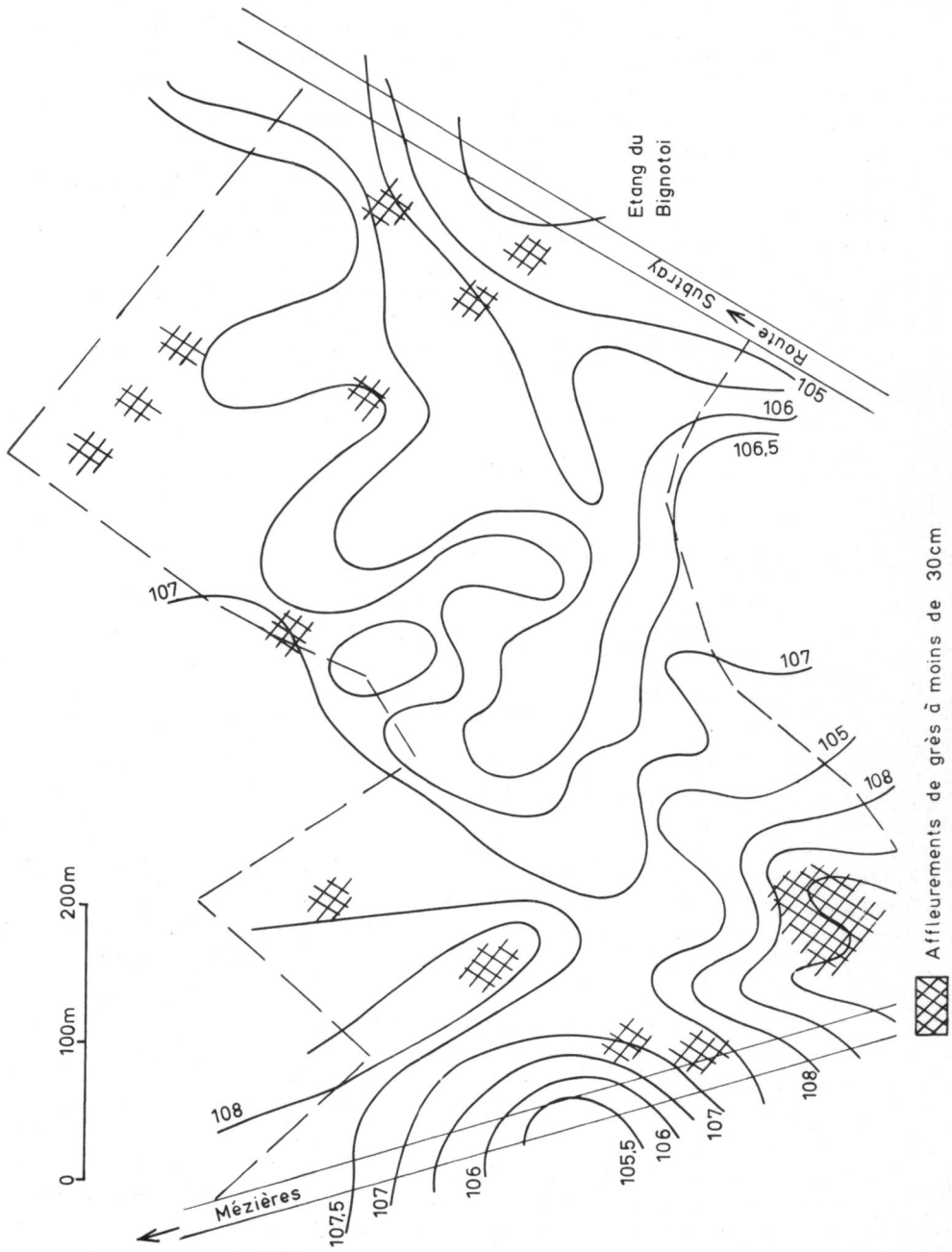


FIG. 8. — *Parcelle de « La Poupetterie » plan et courbes de niveau*

4. — La Poupetterie

(Limite des communes de Mézières, Saint-Michel et Migné, centre-nord de la Brenne, zone assez fortement pentée.)

Le levé topographique traduit ce relief accusé et irrégulier de part et d'autre d'une ligne de crête détachée vers l'ouest (figure 8). Dans cette pièce de 30 hectares, le grès se rencontre entre — 20 et — 70 cm. Il s'agit d'un grès à grain très grossier marbré ocre à très rouge. Comme on le voit sur le plan, les principaux points d'affleurement ne sont pas spécialement et uniquement localisés sur les buttes.

Ce grès, plus ou moins dur et plus ou moins altéré, s'est trouvé recouvert dans les creux d'une argile très fine marmorisée ocre foncé du même type que celle de Tournavaux et l'ensemble est revêtu de sables grossiers. L'influence du relief se traduit pas l'enrichissement en argile de la couche superficielle : 6 p. 100 sur le sommet, 15 p. 100 en bas de pente. L'enrichissement en limons n'est pas systématique ; là où il existe (coin bas nord-ouest) l'hydromorphie superficielle est plus accentuée et se traduit par un rapport C/N encore plus élevé qu'ailleurs (16 au lieu de 13). Les affleurements très irréguliers de grès font que toute la pièce est très humide même sur les sommets.

E. — Conclusions

Les sols de Brenne se montrent sous un aspect morphologique particulier qui se superpose dans le centre Brenne, à la présence de grès à très faibe profondeur. Si des « types » différents de sols introduisent des nuances sensibles, l'extrême hétérogénéité des dépôts complique les études d'ensemble.

Quelques lois générales se dégagent pourtant à l'échelle de la région : c'est à elles qu'est consacrée la suite de ce chapitre.

II. — APERÇU PÉDOLOGIQUE

Comme on l'a bien précisé précédemment, nos études n'ont pas été orientées sur la pédogenèse et il n'est pas question ici d'aborder ce problème complexe qui peut constituer à lui seul un sujet de recherche. Il s'agit simplement de synthétiser les résultats de nombreuses observations et analyses susceptibles de fournir quelques-uns des éléments nécessaires à la compréhension des sols de Brenne.

Nous nous limiterons donc à présenter les données essentielles sur les roches-mères et à montrer les principaux « types granulométriques » de profils. Quelques critères analytiques complémentaires permettront ensuite d'orienter l'interprétation de l'ensemble.

A. — Les roches-mères

Malgré la complexité des sols de Brenne dans le détail, l'ensemble forme un tout homogène traduisant une origine commune, bien différenciée des autres régions naturelles du département ; les contacts avec les formations voisines constituent des zones de transition.

1. — Méthode d'analyse

a) *Analyses chimiques totales.*

Après de nombreux essais préalables, la méthode finalement adoptée pour sa relative rapidité en analyses de séries est la suivante :

α) *fusion à la soude* (par la méthode Guennelon 1960).

Insolubilisation de la silice par frittage et dosage par gravimétrie classique, corrigée des impuretés (attaque fluorhydrique).

Sur le filtrat de la silice :

— dosage direct de Fe_2O_3 par l'O-phénanthroline,

— évaluation de la somme des hydroxydes par précipitation à NH_4OH et calcination (méthode Lapadu-Hargues, 1957).

— recherche et dosage éventuel de P_2O_5 par coeruléomolybdimétrie.

Calcul de Al_2O_3 par différence.

Sur le filtrat des hydroxydes, dosage de MnO par colorimétrie au périodate après élimination du chlore par attaque nitrique.

β) *attaque sulfofluorhydrique* (méthode de Jackson, 1958).

Dosage des alcalins au photomètre à flamme.

Dosage de Ca + Mg par complexométrie après élimination des hydroxydes et de Ca par complexométrie après élimination des hydroxydes, puis des sels ammoniacaux.

γ) *Solubilisation sulfofluorhydrique* — (méthode Lapadu-Hargues 1957).

Dosage manganimétrique du fer ferreux

On trouvera en annexe les détails opératoires.

b) *Analyses granulométriques*

Elles seront présentées en même temps que les études de profils (voir p. 162).

c) *Lames minces d'échantillons de grès*

Examens faits à la Faculté des Sciences de Clermont par P. Tempier.

d) *pH et taux de saturation*

Les pH des échantillons meubles ou argileux ont été mesurés à l'électrode de verre sur des suspensions dans l'eau, dans le rapport habituel terre/eau = 1/2. Sauf précision contraire dans le texte, il s'agit de mesure sur échantillons préalablement séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

Les bases échangeables ont été déplacées par l'acétate d'ammoniaque normal et neutre. Après lavage à l'alcool à 96°, l'ammonium préalablement fixé a été désorbé par un mélange HCl N/20 + Na Cl 10 p. 100. L'ammoniaque est dosée par distillation à la vapeur en présence de soude.

e) *Étude des argiles*

Préparation des argiles : dispersion à la soude après déferrification de la terre à l'hydrosulfite Na tamponné (méthode Hashimito J., Jackson M.L. 1960). Extraction de la fraction $< 2\ \mu$ par 2 sédimentations successives. Floculation par Na Cl, lavages à l'eau par centrifugations successives jusqu'à début de redispersion. Dernier lavage à l'alcool méthylique, séchage à l'air et broyage en poudre (tamis de maille $< 80\ \mu$).

Capacités d'échange — Déplacement du Na fixé par une solution chlorhydrique N/20. Dosage par photométrie de flamme.

Surfaces. — Mesure de la vitesse de désorption de l'éthylène glycol au cours de la dessiccation à l'étuve à 102°. (Nadeau J. C., 1961) : repérage des paliers correspondant à 1 ou 2 couches monomoléculaires interfeuillets et assimilation des résultats obtenus (exprimé en mg glycol fixé par g d'argile) à ceux de O. P. Mehra, M. L. Jackson (1959) à 20° et 110°. Toutes ces mesures ont été faites par l'auteur de la méthode.

Analyses aux rayons X. — Quelques analyses ont été faites parM. Estéoule au Muséum d'histoire naturelle à Paris et par M. Millot à la Faculté des Sciences de Strasbourg.

2. — Les résultats

On trouvera en annexe la liste détaillée des points de prélèvements qui ont fait l'objet des analyses interprétées dans les paragraphes qui suivent.

a) *Analyses totales*

La pleine Brenne qui n'est autre que du Sidérolithique de transport est formée d'éléments détritiques plus ou moins ferrugineux, plus ou moins argileux, de granulométrie plus ou moins fine, mais toujours siliceux et très pauvres en éléments basiques. Le tableau ci-dessous (tableau 3) présente les résultats d'analyses totales des 7 « roches » les plus représentatives de toute la gamme rencontrée en Brenne : Les 4 premières sont consolidées, la 5e un sable meuble, les deux dernières des argiles. L'une des deux argiles, caractéristique par ses incrustations très noires, est particulièrement riche en manganèse, ce type est assez exceptionnel en Brenne. Par contre, même les roches consolidées ont des pertes au feu importantes et des teneurs en Al_2O_3 élevées : le ciment est essentiellement argileux et la présence de gœthite est probable (Steinberg m. 1960). La richesse en fer est variable. Celle en potassium n'est nulle que dans le grès rouge latéritisé où les feldspaths ont complètement disparu. Les éléments alcalinoterreux et le sodium sont presque inexistants comme dans toutes les roches issues d'altération.

TABLEAU 3

Analyses totales de roches

Échantillon	Texture	H_2O à 1 000	SiO_2 (g %)	Al_2O_3 (g %)	Fe_2O_3 (total)	MnO (g %)	K_2O (g %)	Na_2O (g %)	CaO (g %)	MgO (g %)	FeO (g %)
N° 1.....	pierre	6	78,1	11,1	1,64	traces	2,5	0,24	0,45	traces	0,31
N° 1.....	—	4,65	67	20,2	2,2	—	1,74	0,17	0,6	—	0,21
N° 3.....	—	3	86,5	7	0,8	—	1,9	0,28	0,32	—	0,30
N° 4.....	—	4,25	82,5	5,6	7,6	—	0,1	0,15	0,1	—	0,36
N° 5.....	sable	5,72	80,6	8,9	1,4	—	2,3	0,41	0,4	—	0,10
N° 6.....	argile	9	32	22,5	7,15	7,85	1,37	0,17	0	—	
N° 7.....	—	11,6	49,5	27,3	6,4	traces	1,1	0,48	0,3	0,9	0,57

Provenance et aspect des échantillons :

N° 1. — Plaine Ronde (Ciron, versant Brenne) grès marmorisé ocre, grain moyen. (Coordonnées Lambert : *x* 51, *y* 183.)

N° 2. — Bertellerie (Martizay, nord-ouest Brenne) blanc à dentrites roses, grain très fin. (*x* 503, *y* 199.)

N° 3. — Bertellerie (Martizay, nord-ouest Brenne) blanc marmorisé rose, grain grossier. (*x* 503, *y* 199.)

N° 4. — Méobecq, grès rouge du centre Brenne. (*x* 529, *y* 193.)

N° 5. — La Claise (Mézières, secteur centre Brenne) sable. (*x* 519, *y* 199.)

N° 6. — Les Grandes Fourdines (Ruffec, versant Brenne) argile bis tachée noire (*x* 514, *y* 185.)

N° 7. — La Roche (Mézières, bordure Cénomanien Turonien) argile vert très pâle (*x* 516, *y* 202.)

L'argile verte se distingue des roches de Brenne centrale, surtout par des teneurs plus élevées en sodium, magnésium et fer ferreux.

b) *Étude pétrographique*

L'examen de lames minces [1] montre que les roches de Brenne sont formées d'éléments détritiques résultant de l'agglomération de fragments de quartz anguleux ou roulés dans une pâte argileuse. Cette pâte peut représenter 80 p. 100 de la masse totale.

Dans les grès rouges d'apparence latéritique, on ne retrouve que le quartz. Ailleurs, on peut retrouver parfois 2 à 5 p. 100 de feldspaths (microcline) et très peu de muscovite. La biotite a été signalée en bordure nord et ouest de Brenne (échantillons 3 des analyses totales).

Les dépôts cénomaniens en place (bordure N.-E. de Brenne) se différencient nettement du reste par la présence de glauconie et de chlorite. Par contre les zones détritiques voisines et à première vue de même aspect (échantillon 7 des analyses totales) ne possèdent plus ces minéraux.

c) *Granulométrie*

La granulométrie des différentes roches est extrêmement variable. Les courbes représentatives de l'horizon de C des profils étudiés (p. 164 à 168) en donnent des exemples ; la teneur en argile, la grosseur et la répartition dimensionnelle des sables présentent un éventail extrêmement large.

d) *pH*

Rappelons que la formation Brenne a plusieurs origines :

— les dépôts détritiques bartoniens issus du cristallin et du trias,

— les dépôts détritiques bartoniens provenant du remaniement de l'embase du Jurassique,

— les dépôts détritiques plus récents du Miocène et les alluvions anciennes.

A l'intérieur de chaque classe, les faciès sont très variés et la différenciation entre ces différents matériaux détritiques est parfois difficile. Seuls n'ont d'ailleurs été étudiés que les dépôts ayant donné naissance à des sols, au sens pédologique du terme, ce qui exclut notamment tous les affleurements de pouddingues de bordure de Creuse. Sous cet aspect volontairement limité, deux grands types de dépôts restent en comparaison.

— Les formations du centre Brenne : grès (rouges ou bigarrés) et argiles (ocre ou marmorisées ou blanches),

— Les formations de bordure de Brenne : exclusivement des argiles ocre ou vert pâle et des sables.

[1] Études faites par M. Tempier au laboratoire de géologie de la Faculté des Sciences de Clermont.

Centre Brenne.

Le tableau 4 qui présente plus loin des résultats d'analyse montre que le pH de l'arène gréseuse (horizon C des profils étudiés n° 39, 14, 35) se tient entre 4,3 et 4,8. A ce pH correspond un taux de saturation de l'ordre de 60 p. 100, quelle que soit la couleur et la texture de la roche.

Les dépôts argileux, qu'il s'agisse d'argile ocre ou très blanche (profil n° 61), ont des caractéristiques identiques : le pH peut même descendre à 3,9.

Bordure Brenne.

Le tableau 8 donne un exemple d'argile des bordures d'étages secondaires (profil n° 615). Les nombreux prélèvements de bordure de Creuse ont les mêmes caractéristiques physicochimiques. Ces horizons sont décarbonatés mais restent saturés et leur pH se tient entre 6,8 et 7,2.

C'est ce critère qui différencie le plus nettement les 2 types de dépôts éocènes.

e) *Les argiles*

Malgré le nombre limité d'analyses complètes qui a pu être fait, les argiles de Brenne semblent pouvoir se classer en 3 groupes principaux :

1. — Des argiles à très faible capacité d'échange (18 à 25 meq./100 g), à surface peu importante et sensiblement constante quelle que soit la température (25 à 50 mg glycol/g) : celles-ci sont en effet essentiellement kaoloniques ; elles sont prépondérantes dans les dépôts sidérolithiques de transport de pleine Brenne.

2. — Des argiles à capacité d'échange un peu plus élevée (35 à 40 meq./100 g), à surface plus grande et surtout présence de réseaux expansibles (35 mg glycol/g fixé à 110° contre 50 à 60 à froid).

Ce type correspond aux placages de granulométrie fine rencontrés surtout dans l'ouest de la Brenne et de façon sporadique dans la moitié sud et est de la région. Encore à prédominance kaolonique, ces échantillons contiennent des phyllites plus « ouvertes ».

3. — Des argiles nettement moins kaoloniques se rencontrent au contact même du Jurassique : elles ont une capacité d'échange plus élevée, de 50 à 65 et même 72 meq/100 g, elles retiennent 90 à 120 mg glycol/g à froid et 70 à 110° : la présence d'interstratifiés est certaine [1] la prédominance de montmorillonite est possible [2]. Celle d'illite a en outre été reconnue [2], notamment dans « l'argile verte » dont l'analyse totale est donnée précédemment.

f) *Les sables*

Les sables n'ont pas été étudiés systématiquement. Deux points seulement ont été relevés :

1. — *Les minéraux lourds* extraits au bromoforme (BRAJNIKOV B. Francis BŒUF C., ROMANOWSKY, 1943) sont exceptionnels dans le détritique de transport : on en trouve moins de 1 g pour 1 000 dans la fraction des sables qui en contient le

[1] Analyse faite par M. ESTÉOULE au Muséum d'histoire naturelle.
[2] Analyse faite par M. MILLOT à la Faculté des Sciences de Strasbourg.

plus (125 à 200 μ), contre 10 à 20 g dans le Sidérolithique de bordure de Brenne Les placages sporadiques d'éléments fins sont intermédiaires.

2. — La forme des sables, à l'examen binoculaire (CAILLEUX A., 1952) paraît révéler l'origine éolienne, de certaines buttes aux formes molles de la région des étangs, différentes des « butons » de grès et confirmer l'intense remaniement que la Brenne a subi par l'érosion.

3. — CONCLUSIONS

Deux types fondamentaux de roche-mère se rencontrent en Brenne :

— *Les grès argilolithes du Détritique de transport « lointain »* sont des roches essentiellement quartzeuses, acides, à ciment généralement kaolinique. L'importance de ce ciment, les textures et les couleurs sont très variables, mais ces caractères sont finalement accessoires.

— *Les formations semblant dérivées du Jurassique* et retransportées sur des distances moindres sont décalcarifiées, mais non désaturées. Les argiles encore kaoliniques, contiennent cependant une proportion plus ou moins importante de minéraux à réseaux expansibles, interstratifiés et souvent un peu d'illite.

La différence de pH entre les deux formations est fondamentale (STEINBERG, 1961) : pratiquement elle permet de faire la distinction sûre entre le centre Brenne (taches de calcaire mises à part) et les bordures de Brenne.

Pour les argiles, quelques nuances sont à introduire dans le schéma ci-dessus : si les conditions de dépôts en eau douce sont bien à l'origine de la prédominance kaolinique (MILLOT, 1949), des gisements montmorillonitiques ont aussi été identifiés dans le Sidérolithique, sans qu'il soit possible de les rattacher à un remaniement d'un étage secondaire (STEINBERG, 1961) : ceci peut expliquer que certaines analyses du centre Brenne ait révélé la présence de Montmorillonite.

En tout état de cause, il ne faut jamais oublier qu'en Brenne on se trouve devant un matériau très complexe par ses origines, ses conditions de dépôt et les profonds remaniements dont il a été le siège ; l'étude détaillée d'un point particulier arbitraire apparaît toujours difficile. Par contre, transposé à l'échelle de la région, le problème est relativement simple : la roche-mère en Brenne est ce sol « fossile » formé à l'Éocène par un matériau détritique de transport déposé au sein de courants plus ou moins violents à côté de lagunes plus calmes. Ces conditions locales très variables expliquent la variété des « faciès » (RIVIÈRE A., 1953).

Quelques nuances apparaissent entre la Brenne centrale formée d'éléments très appauvris par l'importance de la dégradation au cours du transport et les « bordures de Brenne » où l'influence locale du Jurassique en place se fait sentir.

B. — Les différents types granulométriques de profils

1 — MÉTHODES D'ANALYSE

Les analyses granulométriques détaillées ont été faites sur dispersion au citrate de soude ammoniacal ou au méthaphosphate, par pipetages répétés (pipette Robinson ou densimétrie (méthode MÉRIAUX S., 1957). Quelle que soit la méthode de dispersion et de mesure et malgré la multiplication des essais, les résultats obtenus n'ont jamais

été très satisfaisants : les variations qui peuvent atteindre 7 à 8 % ont finalement été attribuées à une dispersion insuffisante des horizons enrichis en complexes colloïdaux plus ou moins définis et à une évolution possible de ces complexes lors du séchage et de la conservation des échantillons (PLAISANCE B., VAN DER MAREL H. W., 1960).

Les sables ont été fractionnés sur colonnes de tamis.

L'ensemble des résultats à été traduit sous forme de courbes cumulatives et polygones de fréquence (Mme MÉRIAUX, 1955) ; ce sont les pourcentages obtenus par rapport à la terre fine totale qui ont été gardés, non ramenés à la seule fraction minérale : les quantités de matières organiques dosées sont trop faibles pour modifier la forme des courbes et les schémas adoptés présentent l'avantage de rendre immédiatement lisible sur le graphique ce taux de matières organiques.

Les matières organiques ont été dosées par la méthode ANNE (1945).

2 — LES DIFFÉRENTS PROFILS

Deux types fondamentaux de sols se rencontrent en Brenne : le véritable profil pédologique et la superposition de dépôts différents très contrastés. Le premier type se subdivise en deux sous-types : le profil issu du grès en place et le profil formé sur remaniement préalable du dépôt sidérolithique.

a) *Profils pédologiques en place*

Le grès sous-jacent, en arène, constitue l'horizon C. Les courbes granulométriques sont homogènes ; les histogrammes se superposent.

Comme on l'a vu précédemment, cette roche-mère en place nous apparaît variable dans sa granulométrie, plus ou moins argileuse, à sables plus ou moins fins et plus ou moins limoneux, plus ou moins « triés » autour d'une dimension privilégiée.

Ces différentes textures d'origine ont donné naissance à des profils divers de degrés variables d'évolution : ils sont présentés ci-dessous classés d'après l'indice d'entraînement de l'argile, c'est-à-dire le rapport du taux d'argile dans l'horizon apparemment enrichi à celui de l'horizon appauvri (DUCHAUFOUR,. 1960). On trouvera en annexe les Coordonnées Lambert des différents profils étudiés ci-dessous.

α) *Indice d'entraînement de l'argile inférieur à* 2 (fig 9 et 10).

— sol (couche superficielle) sableux : profil n° 605, centre-nord de Brenne,
— sol assez argileux : n° 39, centre-sud Brenne,
— sol très argileux : n° 91 et 21 nord et nord-est Brenne.

β) *Indice entre* 2 *et* 3 (fig. 11) assez argileux et plus ou moins limoneux.

— profils n° 14 et 41, centre sud de Brenne.

γ) *Indice supérieur à* 3 (fig. 12 et 13).

Ces derniers sols sont les plus communément répandus. Certains sont assez argileux mais la plupart sont très sableux en surface.

Toute la gamme des répartitions granulométriques des sables se retrouve, depuis les éléments très fins (pointe accusée vers 31,5 μ : profil n°2, Centre-Sud), les éléments fins (100 à 300 μ : profil n° 35) jusqu'aux sables plus gros, mais inférieurs à 800 μ (profil n° 64). Ici le tri des sables est très poussé (S n° 35), là la répartition est plus homogène (n° 450).

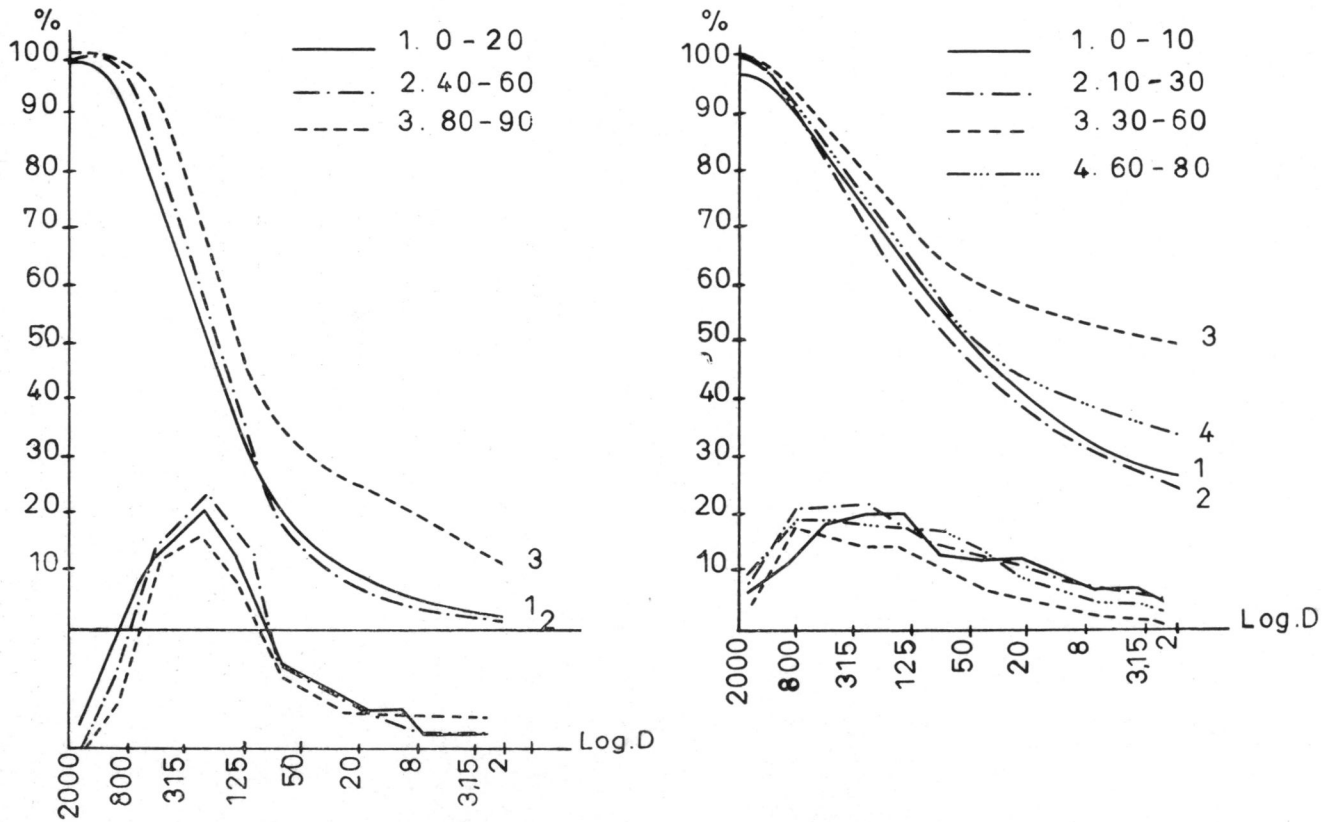


FIG. 9. — *Courbes granulométriques : Sols en place type α*

A gauche : S n° 605 : Mézières-en-Brenne, domaine de la Claise, *sableux*,
A droite : S n° 39 : Migné-Tournavaux (Chante-pie), moyennement *argileux*.

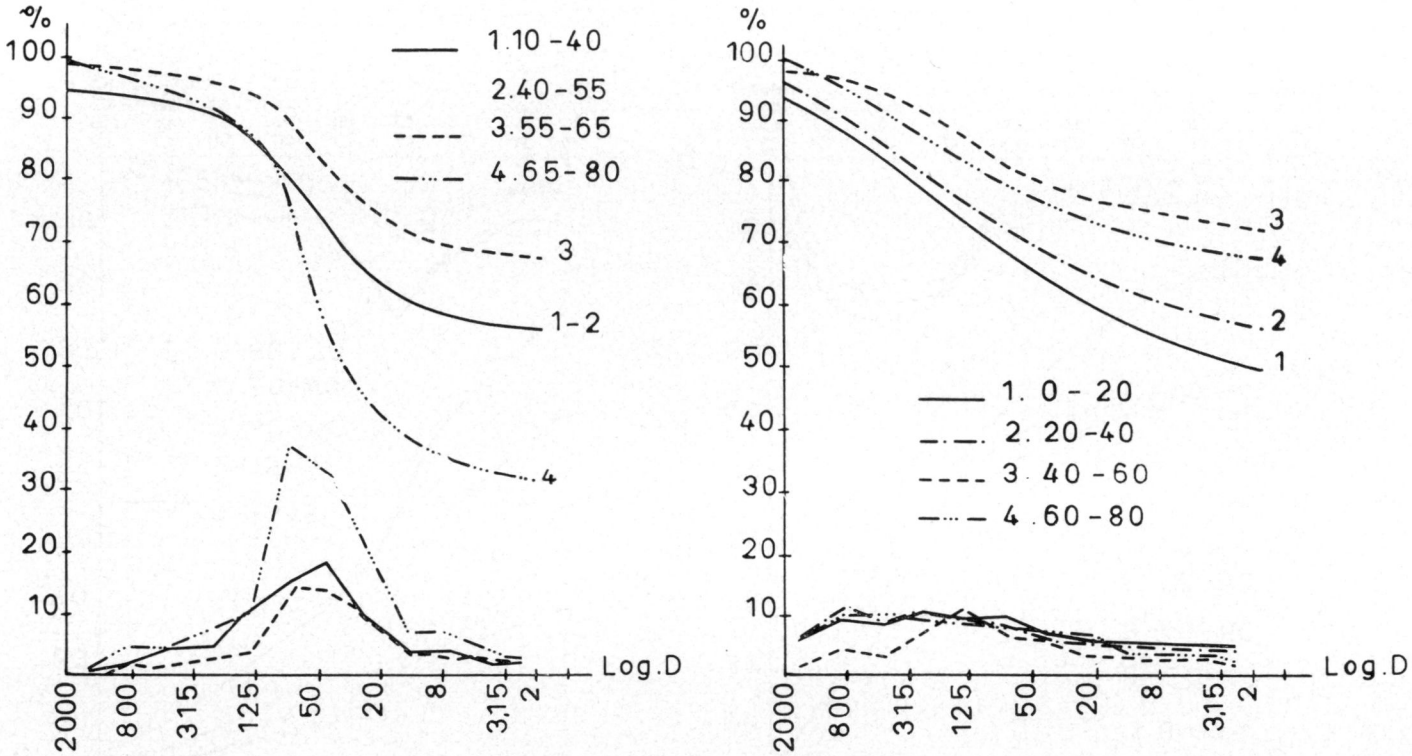


FIG. 10. — *Courbes granulométriques : Sols en place type α : très argileux*
A gauche : S n° 91 : Forêt de Lancosme (La Chapelle-Saint-Sulpice),
A droite : S n° 21 : Mézières-en-Brenne — Pré Pissou.

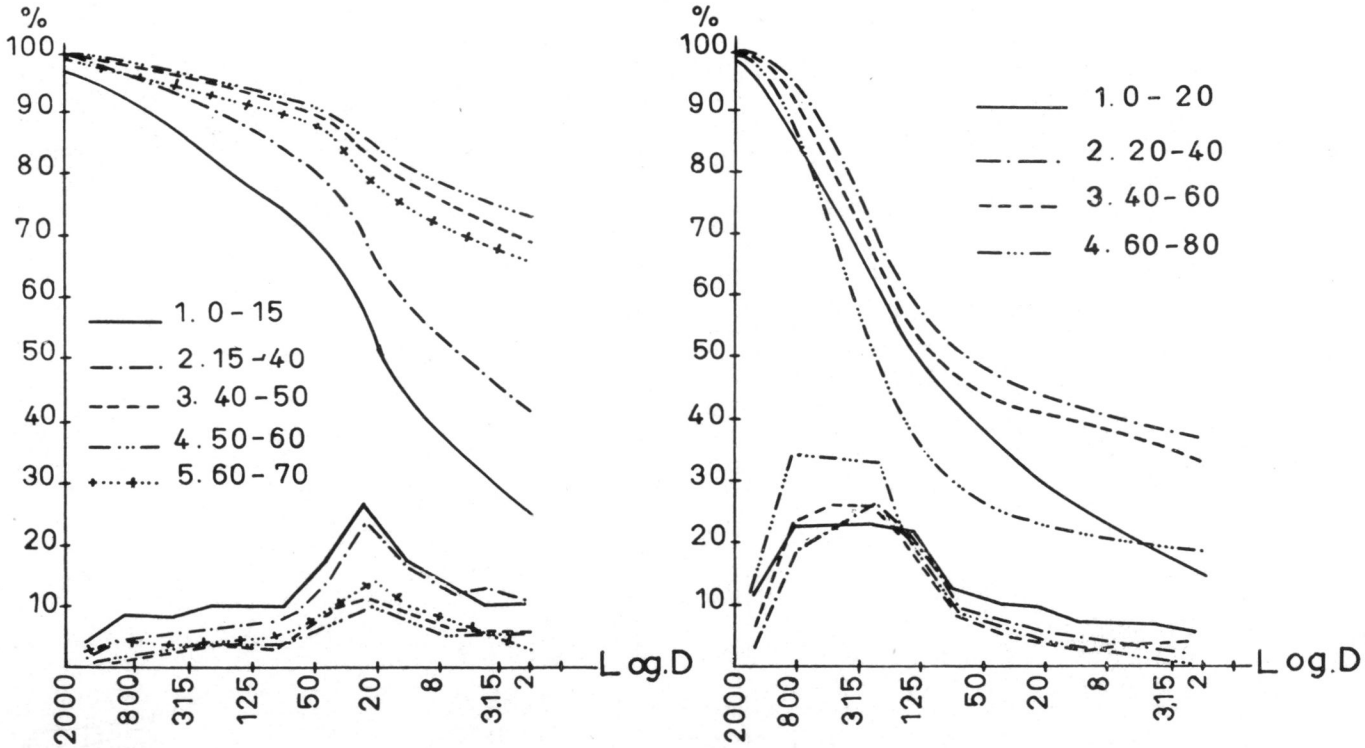


FIG. 11. — *Courbes granulométriques : Sols en place, type* β
A gauche : type limoneux, *S nº 14* Ciron/Terres de Brandes (lieu-dit),
A droite : type non limoneux, *S nº 41* Migné — Huche-Mouche.

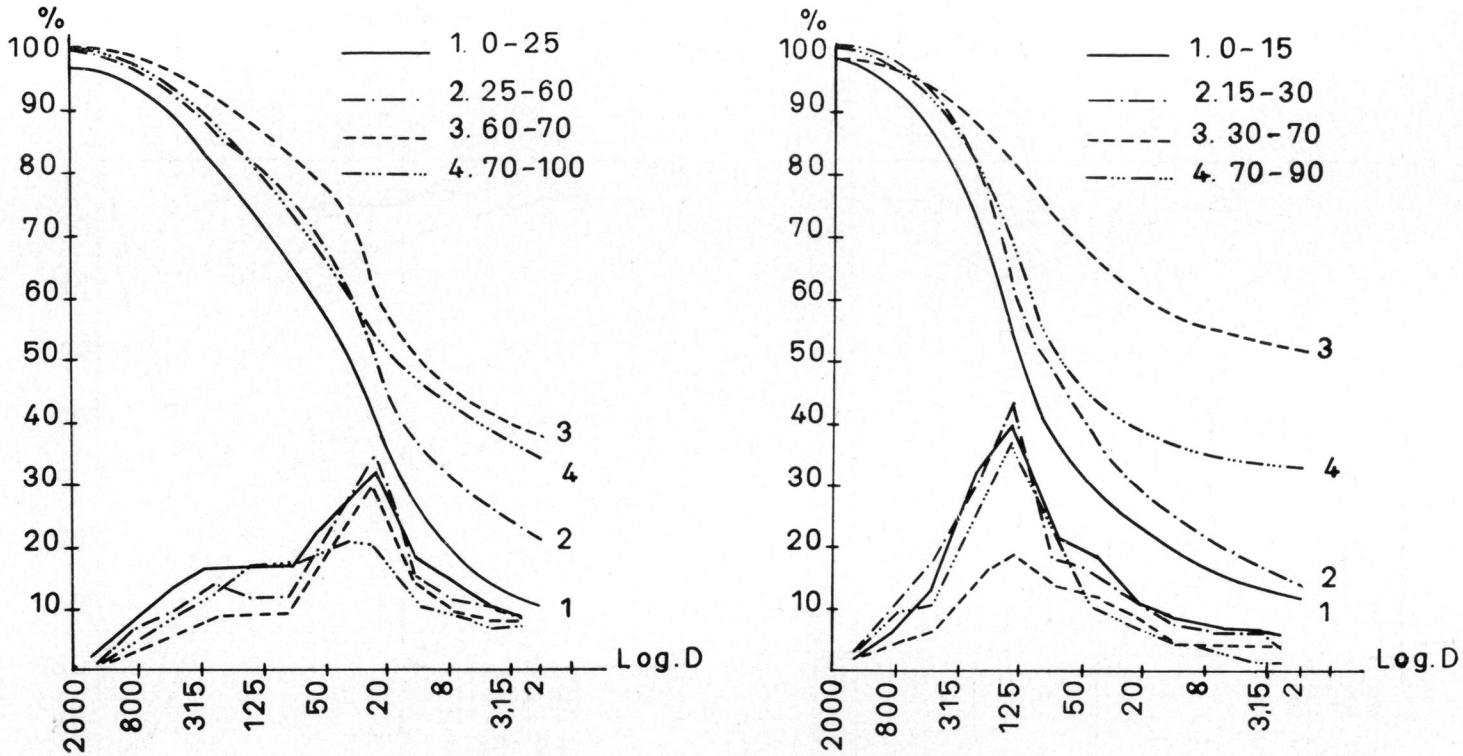


FIG. 12. — *Courbes granulométriques : Sols en place, type γ*
A gauche : S n° 2, Ciron — Le Petit Bois-Latour (*sols très fins*),
A droite : S n° 35, Méobecq — limite Luant (*sols fins*).

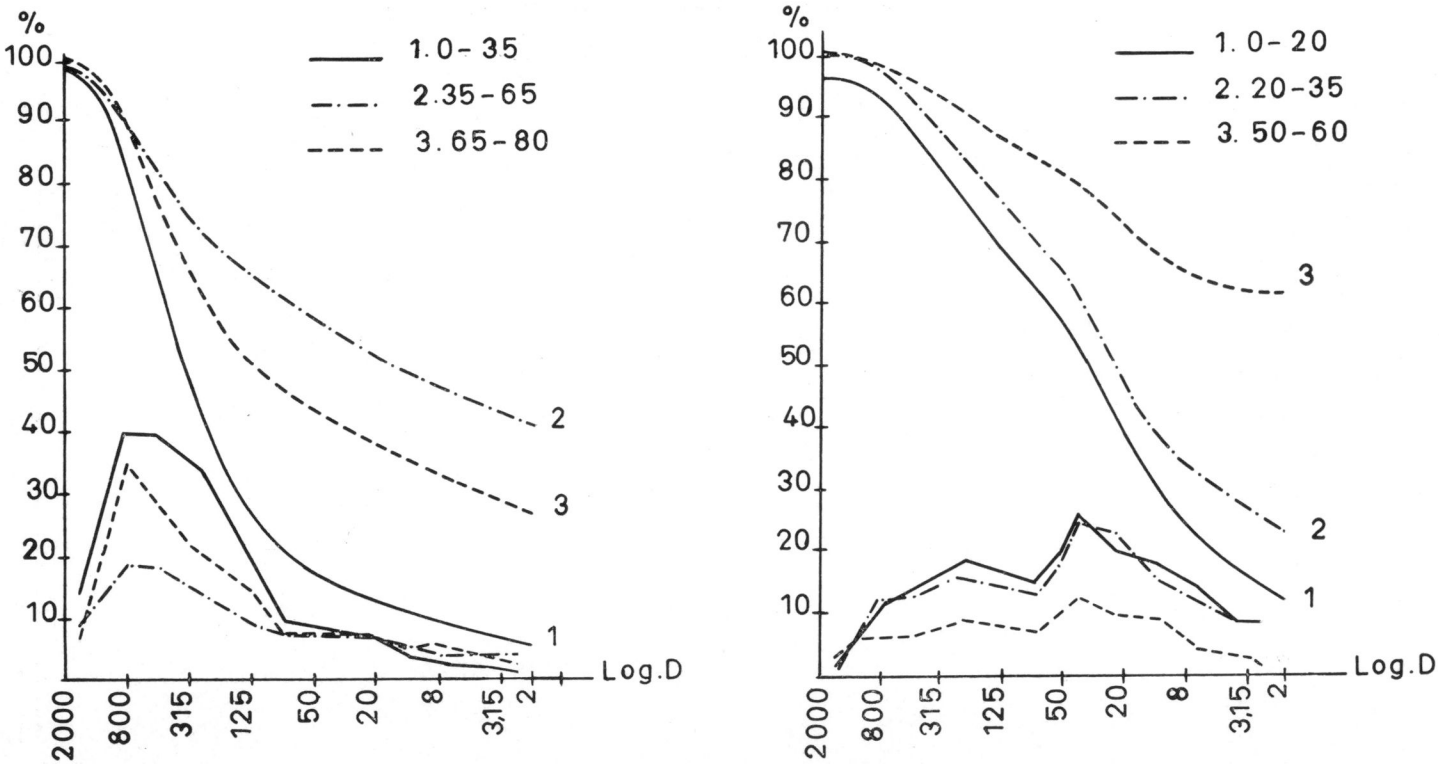
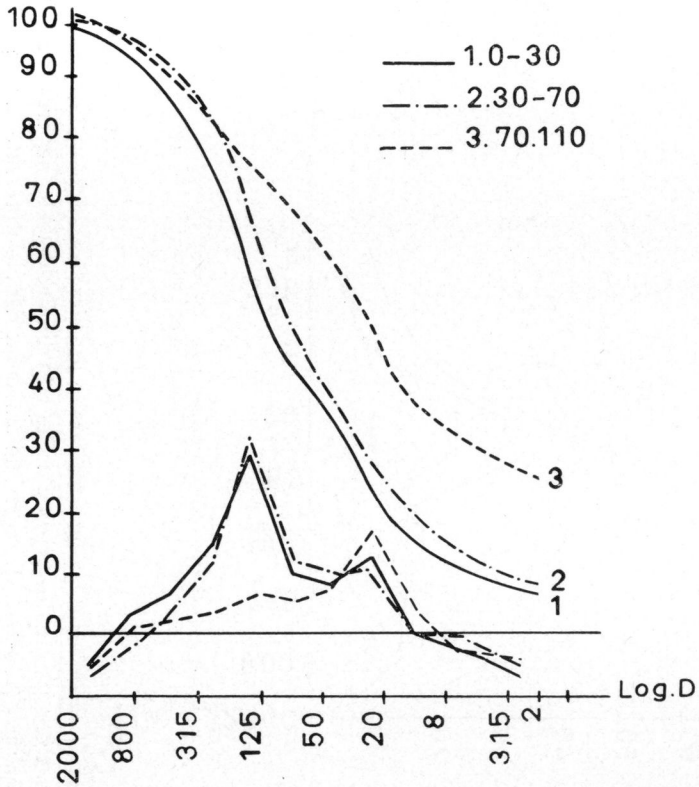


FIG. 13. — *Courbes granulométriques : sols en place, type γ*
A gauche : S n° 64, Rosnay — limite Saint-Michel (sols assez grossiers),
A droite : S n° 450, Ciron — La Plaine Ronde (répartition homogène des sables).



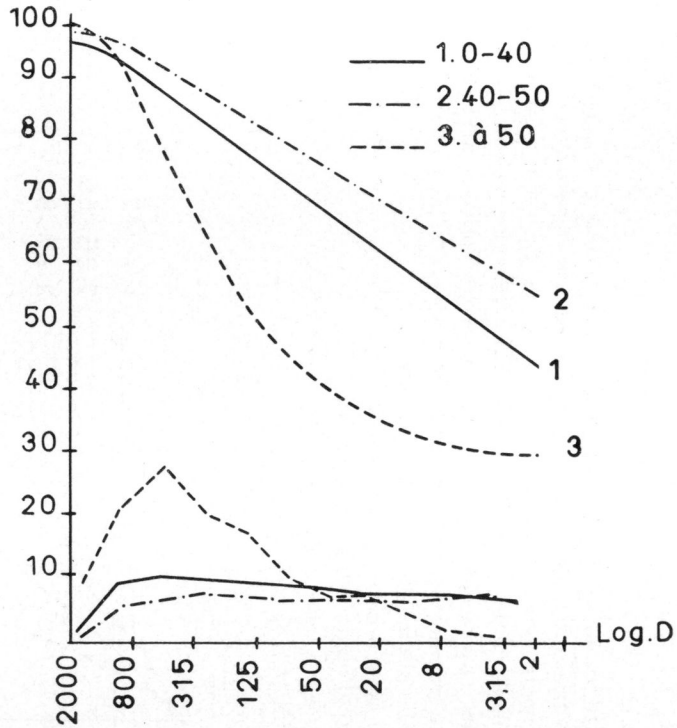


FIG. 14. — *Courbes granulométriques : sols de couverture type α*
A gauche : S n° 166, Luant — Les Grandes Bruyères,
A droite : S n° 68 : Mézières-en-Brenne, La Claise.

b) *Sols évolués de couverture*

On rencontre les mêmes types que précédemment, mais le grès sous-jacent est d'une granulométrie différente : on est en présence d'un recouvrement du grès de base par des éléments arrachés ailleurs. Dans ce cas, la transition n'est pas toujours nette et il est difficile de retrouver l'horizon C du profil évolué, plus ou moins mélangé avec les éléments sous-jacents en place. Par contre les horizons A et B présentent une homogénéité granulométrique qui permet de classer ces sols comme précédemment d'après l'indice d'entraînement apparent de l'argile.

α) *Indice d'entraînement apparent de l'argile inférieur à* 2 (fig : 14) — type sableux (profil 166) ou un peu argileux (profil 68).

β) *Indice compris entre* 2 *et* 3 (fig : 15) assez argileux ou sableux à sables fins ou très fins (profil 55).

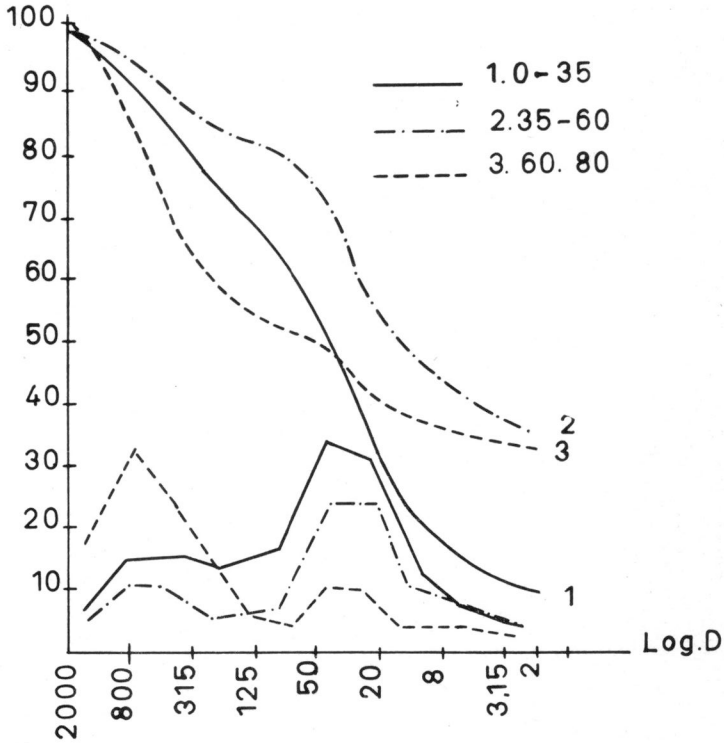


FIG. 15. — *Courbes granulométriques : sol de couverture, type* β
S n° 55 : Migné — limite Saint-Gaultier.

γ) *Indice supérieur à* 3 (fig : 16) assez grossiers en surface (mais sables peu supérieurs à 800 μ) sur des types d'argile très différents : à sables très fins, 20-80 μ (n° 101) ou fins (100-200 μ), ou même sur deux dépôts différents, argile puis grès (n° 65).

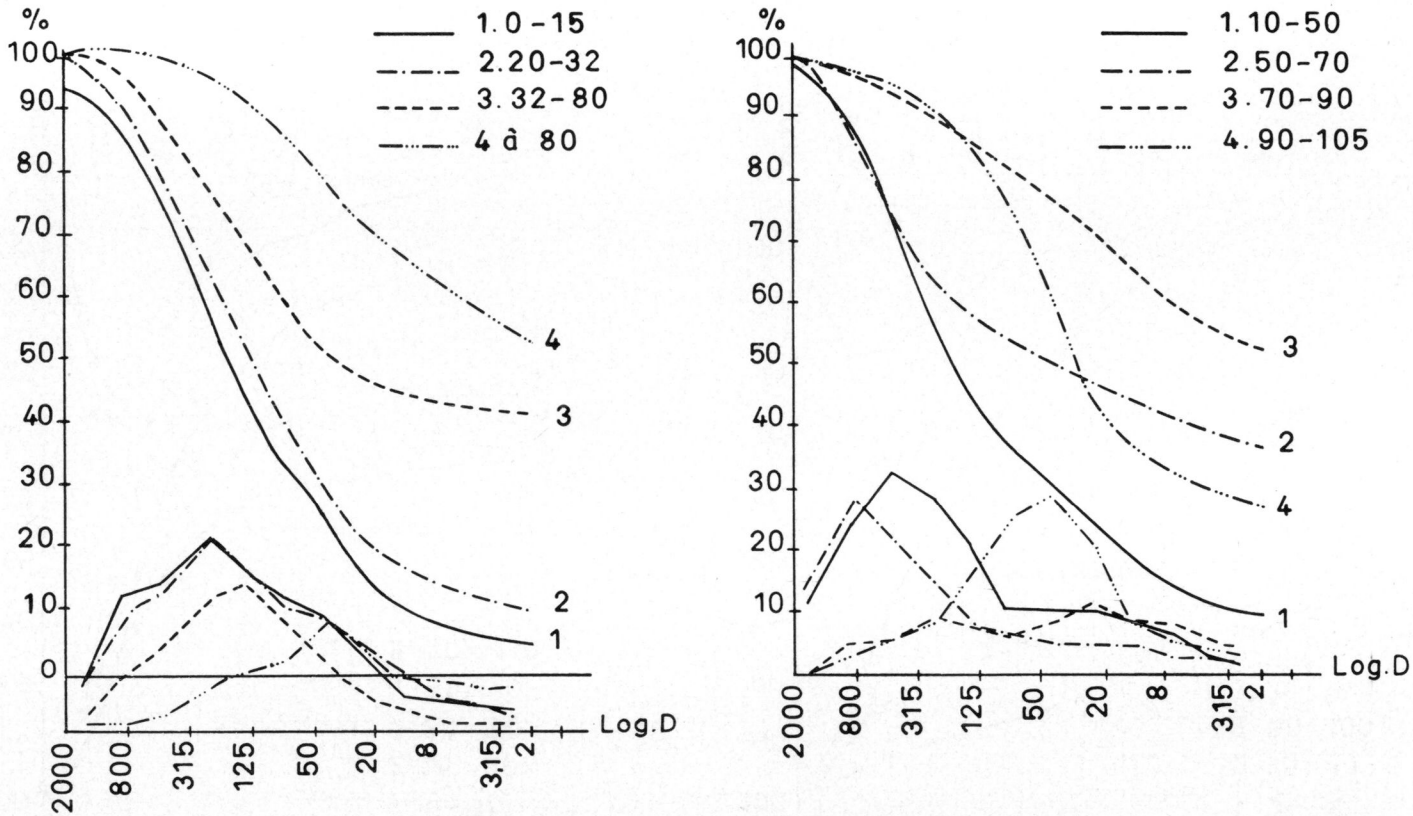


FIG. 16. — *Courbes granulométriques : sols de couverture, type γ*
A gauche : S n° 101, Vendœuvres, forêt de Lancosme,
A droite : S n° 65, Rosnay — étang Gabrière.

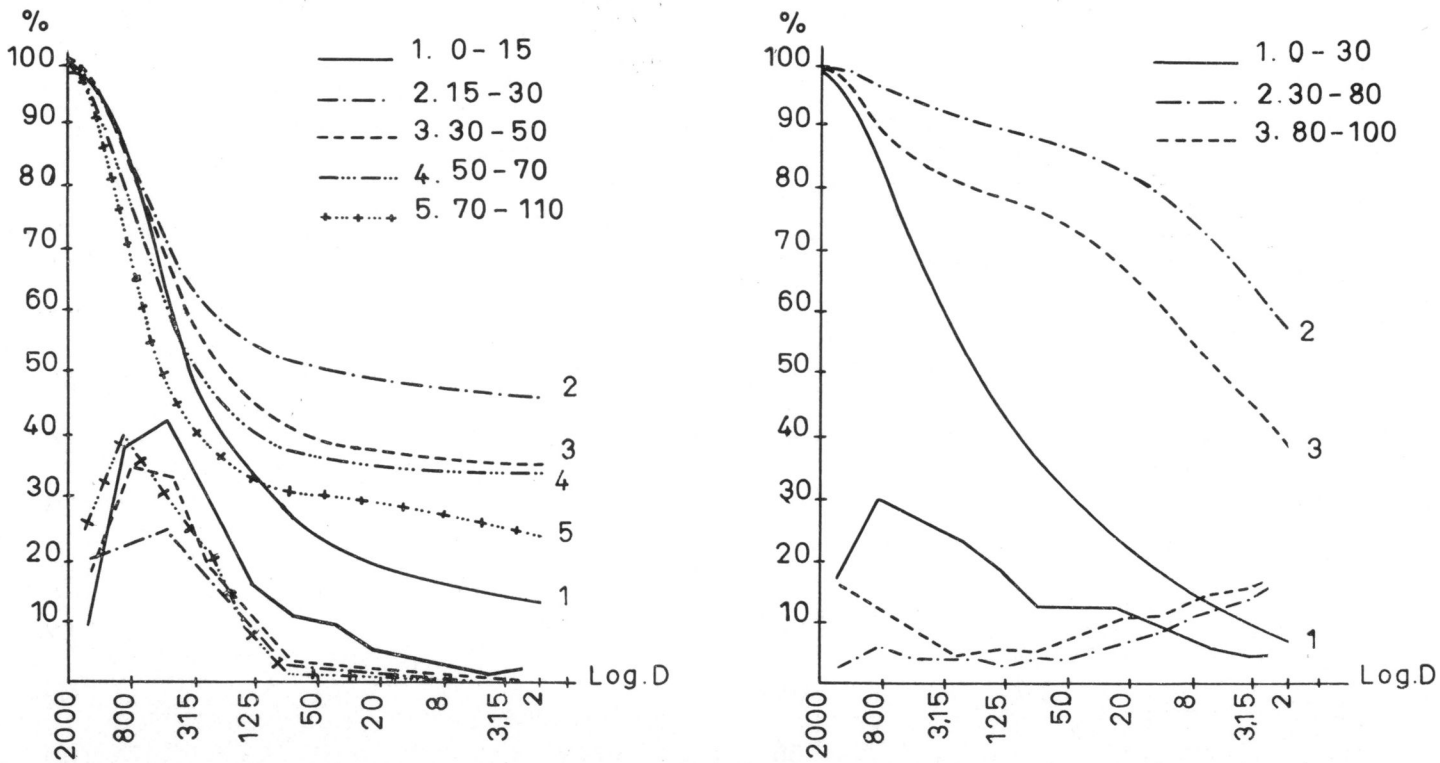


FIG. 17. — *Courbes granulométriques : dépôts successifs*
A gauche : S n° 20, Mézières-en-Brenne, Champ de Blain,
A droite : S n° 61, Rosnay-anticlinal.

c) *Sols constitués par des dépôts successifs peu épais*

On assiste ici à la superposition de dépôts très différents. Certains occupent de grandes étendues, d'autres sont très localisés, les uns en plein centre Brenne, les autres en bordure (fig : 17 et 18) :

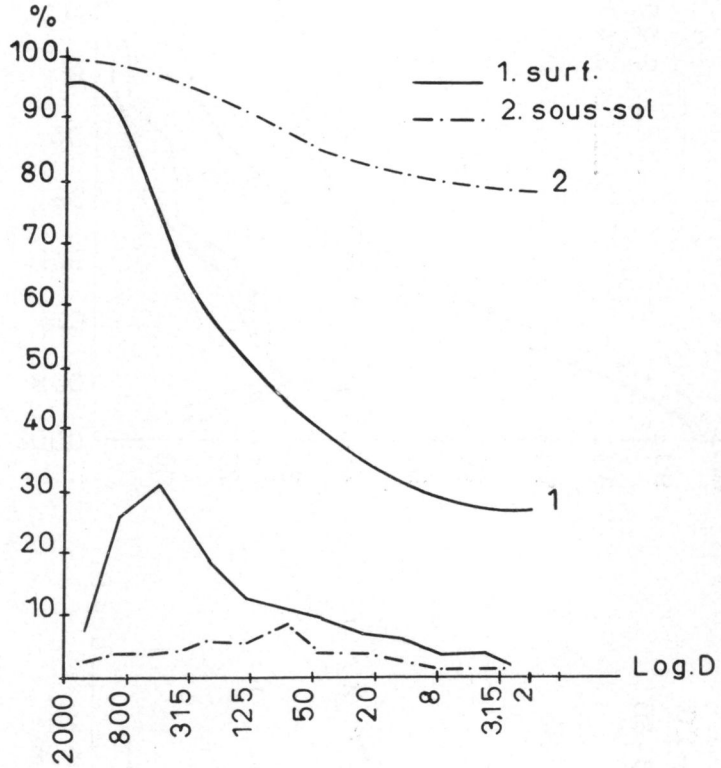


FIG. 18. — *Courbes granulométriques : dépôts successifs*
S n° 615, Mézières-en-Brenne — La Roche.

— *en plein centre Brenne* — on rencontre :

— des placages peu épais (20 cm) de sables grossiers de dimension inférieure à 800 μ et roulés, soit directement sur le grès d'un grain moyen, soit sur un intermédiaire argileux à grain très fin. Ces sols se trouvent dans le centre-nord de Brenne, à relief marqué ; le grès y affleure à des niveaux très irréguliers entre — 20 et — 60 cm à quelques décimètres de distance ; les poches d'argiles remplissent les creux, le tout est surmonté de sables ; on est ici en présence de sols profondément remaniés par les courants. L'exemple cité précédemment (La Poupetterie, fig : 8), illustre cette disposition.

— des sables gravillonneux sur argile kaolinique presque pure ; elle forme des poches en plein centre Brenne sur l'arête centrale (profil n° 61 — fig : 17). Ces poches d'argile blanche, d'importance limitée, se retrouvent vers le nord et le nord-ouest.

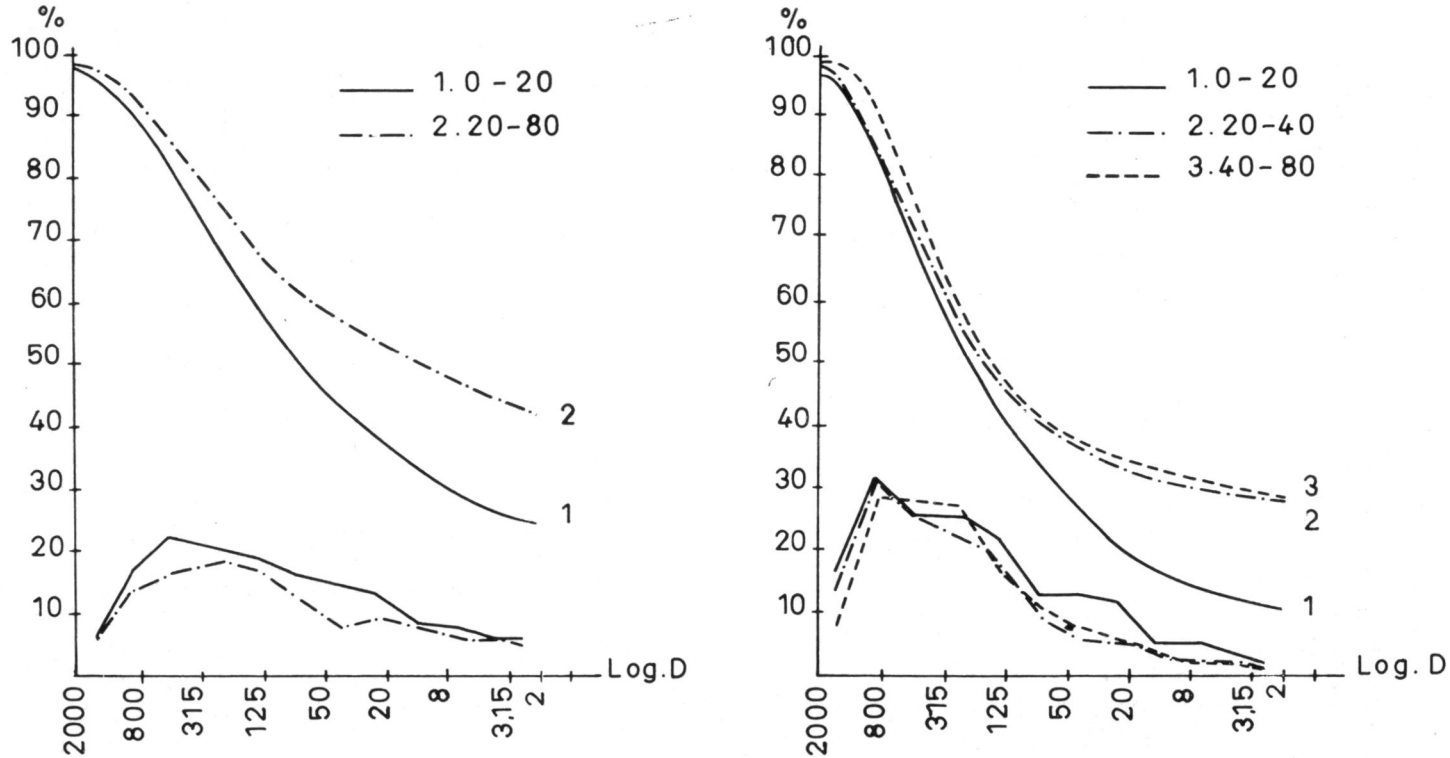


FIG. 19. — *Courbes granulométriques : profils de bordure de Creuse*
A gauche : S nº 6 Ciron, route de Rosnay,
A droite : S nº 11 Ciron, La Métairie.

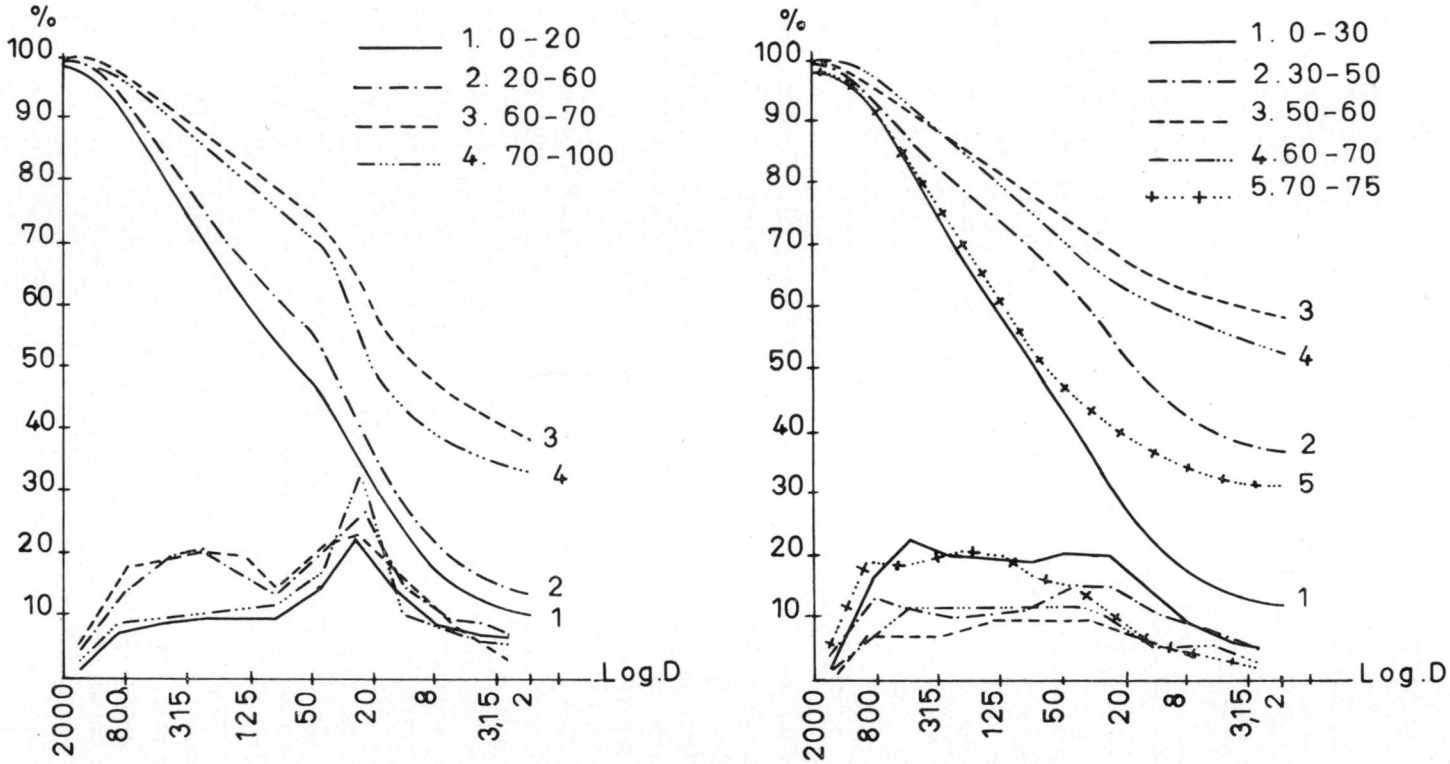


FIG. 20. — *Courbes granulométriques : profils de bordure de Creuse*
A gauche : S nº 12, Ciron — La Métairie,
A droite : S nº 18, Ciron — Les Pièces d'Azay.

— *en bordure de Brenne* — à la limite des étages secondaires, on rencontre:

— des placages de sables alluvionnaires, argileux, sur l'argile verte plastique de bordure de Claise en amont de Mézières (profil n° 615 ; fig : 18).

— des couches successives de sables grossiers un peu argileux en bordure de la Claise (profil n° 20 — fig : 17)

— des sables profonds plus ou moins caillouteux déposés en lits de sédimentation en bordure de la Claise au sud et au sud-est de Mézières. On observe sur eux une, migration nette du fer et des matières organiques avec formations très localisées et limitées d'alios au niveau des bancs de cailloutis plus gros (profil A 975, voir plus loin tableau d'analyse 5).

— en bordure de Creuse, l'hétérogénéité est maxima : on peut y rencontrer tous les types précédemment décrits (fig. 19) depuis un faible lessivage de l'argile (n° 6), jusqu'à un entraînement particulièrement élevé (n° 12 et 18) avec toutes les répartitions possibles des sables. L'ensemble peut se juxtaposer sur une même parcelle à des sols bruns calcaires ou même de rendzines (cas de la Métairie, au sud de la Creuse).

3 — Répartition géographique des différents sols

Toutes les courbes fournies précédemment illustrent la variabilité des sols en Brenne, non seulement dans les différents types d'évolution mais également dans la diversité granulométrique des dépôts.

Si l'hétérogénéité est grande au niveau de la parcelle, il existe néanmoins une répartition géographique préférentielle des types à l'échelle de la Région :

Dans le centre Brenne, bordures de Creuse et de Claise exclues, on rencontre schématiquement :

— en plein Centre, de préférence les profils très sableux et assez grossiers, peu profonds, avec prédominance de profils issus du grès en place et des placages variés trop remaniés pour qu'on y décèle une quelconque évolution.

— en s'éloignant du Centre, les profils évolués de couverture dominent et avec eux les sols superficiellement argileux et plus riches en éléments fins ; l'horizon très argileux affleure ici à moins de 50 cm vers le nord et le sud-est ; les sables sont souvent assez bien triés vers les dimensions faibles ; vers le sud-ouest, ils paraissent mieux répartis.

En bordure de Brenne, à la limite des étages secondaires, l'hétérogénéité est maxima ; comme on l'a vu précédemment, on trouve schématiquement :

— vers le nord-est des sols le plus souvent très argileux (argile verte apparentée au Cénomanien),

— au nord, dans la région de Mézières, sur la rive gauche de la Claise, des sables caillouteux profonds,

— au nord-ouest, des sols argilo-limoneux profonds,

— en bordure de Creuse, un mélange à très petite échelle, de sables, cailloux, argiles, grès et calcaire.

C. — Autres critères analytiques

1. — Méthodes analytiques

pH (*eau*) méthode classique, (voir précédemment p.158).

Bases échangeables : contacts et lessivages à l'acétate NH_4 neutre et normal — dosage K et Na par photométrie de flamme, Ca-Mg par complexométrie (Mlle Mazoyer 1954).

Capacité d'échange : après l'extraction des bases échangeables, élimination de l'excès d'acétate par l'alcool à 96° — Déplacement de NH_4 par une solution d'HCN/20 contenant 10 p. 100 Na Cl — dosage de NH_4 par distillation (voir précédemment p. 158).

Fer libre. — Méthode Deb adaptée (Robichet 1957) et Demolon (1926).

N *total*, par Kjeldahl.

Carbone, méthode Anne (1945).

Ammonium rétrogradé, méthode Dharival-Stevenson 1958.

Argiles, mêmes méthodes que précédemment (voir p. 158).

Aluminium échangeable et libre, déplacé par NH_4Cl et dosage par l'aluminon (voir pour l'ensemble de la méthode et son interprétation R. Blanchet S. Périgaud et *al.*, 1960).

Complexes :

1 extraction à HClN/20 jusqu'à élimination totale du Ca.

1 extraction à l'hydrosulfite — citrate tamponné à pH 7 (méthode O. P. Mehra-Jackson).

Dosages : SiO_2 par frittage de l'extrait, reprise à la soude et colorimétrie au molybdate.

Fer : par colorimétrie directe de l'extrait à l'O-phénanthroline.

Al_2O_3 : par colorimétrie à l'aluminon sur le centrifugat de la silice frittée (ou directe dans le seul cas de l'extrait chlorhydrique).

2 — Les profils pédologiques

a) *Analyses chimiques*

Quelques analyses chimiques des profils caractéristiques signalés précédemment sont fournis à titre d'exemple dans le tableau 4 : Dans ce tableau, la classification précédente est reprise, complétée par une appréciation qualitative de l'hydromorphie ; la nature pédologique de l'horizon est précisée à titre purement indicatif et descriptif, étant entendu qu'une discussion sera reprise ultérieurement sur la signification exacte des termes dans le cas de la Brenne.

Il est rappelé que ces résultats proviennent d'échantillons prélevés sur sols de lande récemment défrichée ou couverte en pacages extensifs, mais non de forêts.

Quelques remarques se dégagent de ce tableau :

La teneur en matière organique est souvent encore importante dans les horizons B et C. Mais l'examen du profil en place ne permet pas d'attribuer à priori cette accumulation au lessivage : l'existence systématique de vieilles racines plus ou moins décomposées qui forment un tapis souvent dense entre les grosses mottes d'argile peut expliquer à elle seule ce taux de matière organique.

Les rapports C/N :

— en surface, le rapport C/N est élevé partout où l'hydromorphie est accentuée, (c'est-à-dire l'ennoyage prolongé) et le sol non cultivé (profil n° A 925 vieux pacage). On a vu l'exemple des « terres de Brandes » avec rapport C/N très élevé sur le sommet. La culture fait diminuer ce rapport et dans les secteurs soumis à un assolement céréale-plante-sarclée-fourrage annuel, le rapport C/N dépasse rarement 12, même en zone humide.

— en profondeur, le rapport C/N est faible, entre 2 et 5 dans l'argile. La présence d'ammonium rétrogradé a été mise en évidence, mais en quantité insuffisante (50 à 100 mg/kg) pour permettre de relever ce rapport de façon notable (Gouny — Mériaux, 1960).

TABLEAU 4

Analyses de quelques profils en place

N°	Profondeur	Horizon	Argile (g %)	Mat. org (g %)	C/N	Bases échang. (g/kg)				S (1)	T (2)	Taux saturation %	pH	Fer Deb. %	Fer DEMOKON ppm ou JACKSON % (3)
						Ca	Mg	K	Na						
						1° Classe α (voir texte et figures)									
						Très peu hydromorphe									
605	0-20	A_l	4,0	1,1	10,3	0,75	0,04	0,04	0,00	42,6	46	93	6,3	1,16	
	20-60	A_1	3,5	0,31	6,3	0,15	0,10	0,02	0,00	17,2	21	82	6,7	1,9	
	80-90	B. C	7,5	0,55	3,0	0,45	0,06	0,03	0,01	28,9	29	100	6,7	2,34	
						Très hydromorphe par ennoyage (zone basse)									
39	0-10	A_l	26,0	3,0	14,8	2,0	0,13	0,13	0,03	115	126	92	5,9	2,62	7,5
	10-30	A_1	25,0			0,84	0,21	0,02	0,01				5,0		
	30-60	B	51	0,81	10,6	1,56	0,40	0,04	0,03	113	158	71	4,5	3,44	6,2
	60-80	C	34	0,41	10,4	1,45	0,28	0,03	0,05	99,6	127	78	4,3	2,34	3,2
						2° Classe β									
						Moyennement hydromorphe : perméabilité superficielle et profonde insuffisante									
14	0-15	A_l	24	3,18	14,9	1,7	0,16	0,07	0,02	101	118	86	6,3	3,28	
	15-40	A_1	39	1,14		0,96	0,13	0,05	0,06				4,9		1,92
	40-50	B	68	1,31	16,0	1,4	0,48	0,09	0,10	117	256	46	4,5	4,2	
	50-60	C	72	0,83		1,55	0,59	0,10	0,13	136	296	46	4,3		

(1) S : Somme des bases échangeables en meq/kg.
(2) T : Capacité de saturation en meq/kg.
(3) DEMOLON pour classe α, JACKSON pour β et γ.

Renvoi aux figures :
n° 605, fig. 9 ; n° 39, fig. 9 ; n° 14, fig. 11.

TABLEAU 4 (*suite*)

N°	Profondeur	Horizon	Argile (g %)	Mat. org. (g %)	C/N	Bases échang. (g/kg) Ca	Mg	K	Na	S (1)	T (2)	Taux saturation %	pH	Fer Deb. %	Fer DEMOLON pp m ou JACKSON % (3)
						3° Classe γ									
						Ennoyage par défaut d'écoulement (topographie)									
35	0-15	A_l	12	1,63	12,2	1,40	0,02	0,02	0,02	72,7	67	100	6,8	2,24	4,3
	15-30	A_1	13	0,32	7,6	0,64	0,01	0,02	0,02	34,2	38	90	6,8	2,36	6,7
	30-70	B	51	0,74	19,5	1,79	0,20	0,06	0,04	109	178	61	4,5	4,05	23,8
	70-90	C	32	0,32	12,7	1,20	0,18	0,03	0,05	78	97	81	4,5	3,22	11,6
						Ennoyage par défaut d'écoulement et faible perméabilité superficielle									
450	0-20	A_l	10,1	2,05	11,3	0,8	0,03	0,03	0,01	45	93	50	5,9	2,08	
	25-35	A_2	20,8	0,55	6,7	0,8	0,10	0,03	0,02	50	100	50	5,6	2,5	
	50-60	B. C	60,3	0,55	8,4	1,5	0,65	0,08	0,12	135	234	58	5,0	3,3	
						Ennoyage surtout par mauvaise perméabilité superficielle									
A 27	0-20	A_l	11	1,86	11,3	1,40	0,12	0,04	0,02	82	77	100	6,5	2,32	
	20-35	A_1	17	1,37	10	1,75	0,12	0,04	0,04	100	94	100	6,8	2,26	
	40-60	B	45	0,55	6,8	2,37	0,81	0,08	0,14	194	246	79	4,6	2,36	
	60-80	C	39	0,50	7,0	2,27	0,91	0,07	0,15	199	237	84	4,9	2,26	
						Ennoyage prolongé, par absence totale d'écoulement (topographie)									
A 925	0,30	A_l	18,5	2,61	16,7	0,52	0,04	0,02	0,015	31,1	55	56	5,4	1,73	
	30-50	A_2	20,0	0,48	10,7	0,42	0,06	0,01	0,007	27	34	79	5,3	2,07	
	50-70	B	58,0	0,96	12,2	0,75	0,26	0,04	0,05	64,6	137	74	5,0	3,26	

(1) S : Somme des bases échangeables en meq/kg.
(2) T : Capacité de saturation en meq/kg.
(3) DEMOLON pour classe α, JACKSON pour β et γ.

Renvoi aux figures :
n° 35, fig. 12 ; n° 450, fig. 13 ; n° A 925 : fig. 21
Profil A 925, classe γ, sables fins même type de répartition que le n° 605 (classe α).

Les bases échangeables. révèlent une pauvreté accusée en tous éléments avec légère accumulation du Ca en profondeur et surtout de Na. Le rapport d'entraînement des bases échangeables de A_2 à B est compris entre 2 et 1 lorsque l'horizon A_2 est bien défini. Si ce lessivage aboutit à la saturation de l'horizon B dans le sol non ou très peu hydromorphe (exemple : 605), il peut au contraire, en sol hydromorphe maintenir presque saturé l'horizon A_2 peu argileux au dessus d'un horizon B beaucoup plus enrichi en argile qu'en bases, donc acide (exemple : n° 35).

Le fer libre. n'a pas été partout dosé car il n'a visiblement aucune signification dans les sols hydromorphes où les mouvements de migration très localisés aboutissent à la formation de microzônes très enrichies par rapport aux voisines.

Le pH — reste en rapport étroit avec le taux de saturation dans les horizons superficiels : l'acidité des secteurs ennoyés va de pair avec les rapports C/N les plus élevés (exemple n° A 925).

Par contre, dans les horizons profonds, le pH très bas, voisin de 4, n'est qu'un pH artificiellement mesuré sur la terre fine séchée à l'air, donc réoxydée : il traduit beaucoup plus un potentiel d'oxydoréduction faible dans le sol en place qu'une désaturation intense ; il suffit d'ailleurs de faire la mesure rapidement sur le prélèvement maintenu enfermé dans son état d'humidité initial pour obtenir des pH de 5 à 5,5 au lieu de 4. Comme l'ont déjà signalé PLAISANCE et VAN DER MAREL (1960), les résultats dépendent du traitement que l'échantillon subit entre le prélèvement et l'analyse.

b) *Les argiles*

Il s'agit ici des argiles constitutives des différents horizons d'un même profil.

Caractérisées par leur capacité d'échange, la rétention de glycol à 110° et la différence de rétention entre 20° et 110°, les argiles d'un même profil pédologique ne paraissent pas de même nature tout le long de ce profil (tableau 5).

TABLEAU 5

Variation verticale de la nature des argiles dans les profils pédologiques

	Profondeur	Horizon	Argile (%)	Argile		
				Cap. éch. meq/100 g	Surfaces mg glycol/g. d'argile 20°-110°	à 110°
			1° Sol très peu argileux			
605	1 0-20	A_1	4	25		26
	2 20-60	A_1	3,5	33,5	12	31
	3 80-90	BC	7,5	34	24	31
			2° Sol argileux en profondeur			
A 307	1 20-50	A_1	6	31	2	32
	2 20-50	A_2	5	18	0	21
	3 50-80	B	45	34	23	39
450	1 0-20	A_1	10	29	5,6	26,4
	2 20-35	A_2	20,8			
	3 35-80	B	60,3	39,5	28,5	41,5

Avec des capacités d'échange plus élevées que dans la couche superficielle et une rétention de glycol plus marquée et plus forte à froid qu'à chaud, les argiles des horizons profonds semblent contenir des interstratifiés par opposition aux horizons éluviaux essentiellement Kaoliniques.

Les quelques analyses aux rayons X qui ont été faites révèlent la présence de quartz très fin dans les horizons sableux, confirmée par un résidu d'attaque tri-acide. effectivement élevé (jusqu'à 10 p. 100). La présence de minéraux argileux mal individualisés et plus ou moins colloïdaux est également certaine [1] ; la perte au feu importante des limons (1 à 8 p. 100) malgré la déferrification préalable de la terre peut s'expliquer précisément par cette présence d'éléments colloïdaux de nature, de forme et de dimension non définies.

Les analyses chimiques totales ont été faites sur les mêmes horizons, elles donnent toutes sensiblement les résultats présentés ci-dessous (tableau 6).

TABLEAU 6

Analyse totale des argiles (< 2 μ) — *Quelques exemples*

Chiffres exprimés en g % d'argile séchée à 105°

	Horizon	Perte à 400°	Eau (perte à 1 000°)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	FeO
450	1 A_1		11,6	48,5	28,5	4,9	1,42	0,58	0,53	1,59	0,96
	2 A_2	6,3	11,3	47,8	29,1	7,15	1,36	0,54	0,54	1,61	1,04
	3 B_g	6,6	13,6	45,6	29,8	6,8	1,7	0,48	0,48	1,07	0,75
768	1 A_1		9,1	58,8	25,6	4,25	0,60	0,47	0,66	1,6	
	2 B_g	5,9	11,5	47,2	29,8	7,5	0,22	0,88	1,48	1,43	1,02

L'existence de quartz très fin et de formes colloïdales dépistées par ailleurs rend ces analyses difficilement interprétables selon les normes établies (CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1958).

Elles confirment simplement l'existence prépondérante de la kaolinite, surtout dans le centre Brenne (n° 450) ; elles ne dépistent pas sur une verticale l'évolution du « type » d'argile décelée par les mesures de surface. Elles révèlent des teneurs anormalement élevées en potassium en l'absence totale d'illite décelable aux rayons X : de même que du quartz très fin est présent, l'existence de très fins cristaux de feldspath n'est pas exclue.

c) *Les complexes silico-aluminiques et aluminium libre*

Aucune méthode simple et directe ne peut permettre d'extraire la totalité des complexes, ni surtout de faire la distinction nette entre les formes complexées pseudo-solubles, les formes en voie de cristallisation phylliteuse ou même les éléments provenant du réseau argileux attaqué par l'extrait. D'autre part, l'extractif peut, selon son pH, entraîner certains éléments solubles, mais en précipiter d'autres.

[1] Analyses faites par M. ESTÉOULE au Muséum d'Histoire naturelle.

C'est la raison pour laquelle le recours à 3 types d'extractifs nous a paru nécessaire (voir paragraphe « méthodes » p. 177).

— le premier est acide, HCl N/20, énergique, mais peut attaquer partiellement le réseau argileux.

— le second (extrait JACKSON) est neutre : il ne touche pas aux argiles. Réducteur et citrique il entraîne au moins partiellement les formes complexées du fer et de l'aluminium.

— le troisième sert à caractériser l'aluminium « libre » des sols (R. BLANCHET — S. PÉRIGAUD, 1960). Rappelons que cette technique a permis de mettre en évidence cette forme d'aluminium uniquement dans les sols acides dont le taux de saturation est inférieur à 60%. Dans les sols de Brenne, cet aluminium s'est révélé en partie adsorbé, en partie précipité (notamment sous forme de phosphate).

Le tableau 7 rend compte des résultats obtenus pour 2 profils types en place, l'un relativement argileux et désaturé, l'autre très sableux et pratiquement neutre.

TABLEAU 7

Les différentes formes de complexes silicoaluminiques

Profil n°	450			605		
Horizon	1	2	3	1	2	3
	A_1	A_2	B	A_1	A_2	B
% Argile	10	20	58	4	3,5	7
Taux saturation S/T	50	50	58	93	92	100
1° *Extrait* HCl N/20						
SiO_2 mil.mol./kg	18,6	12,2	34,8	50	9,2	17,5
Al_2O_3 —	11,7	18,4	29,6	5	20,9	15,2
Fe_2O_3 —	1,5	2,5	1,9	1,7	4,7	4,0
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (mol)	1,6	0,66	1,18	10	0,44	1,15
Al_2O_3 meq/kg	70,2	110	177	30	125	91
2° *Extrait hydrosulfite citrate pH* 7.						
SiO_2 mil. mol./kg	22		31	63	5	10
Al_2O_3	5,9		2,5	4	8	0
$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ (mol)	3,7		12,5	16	0,6	
Al_2O_3 meq/kg	35,4		15,0	24	40	0
3° *Acétate Ba pH* 4.						
Al meq/kg	6	24	84	1	1	1

Comme on peut le constater :

— l'hydrosulfite neutre n'extrait pratiquement pas d'aluminium libre : 15 meq/kg contre 84 par l'acétate de baryum à pH 4 (horizon 450. 3),

— par contre, il solubilise d'autres formes d'aluminium, là où l'acétate n'extrait rien (profil 605).

— Cet aluminium extrait par l'hydrosulfite neutre est en quantité souvent très inférieure à celle de la solution acide (15 meq contre 177 dans le 450. 3 ; 91 contre 0

dans le 605. 3). On pourrait donc penser à une attaque effective du réseau phylliteux par l'acide,

— Mais les quantités de SiO_2 extraites dans les deux cas sont du même ordre de grandeur, ce qui exclut l'hypothèse d'une destruction partielle des argiles.

On extrait donc par l'acide et par l'hydrosulfite neutre des formes complexées qui ne sont ni de l'argile, ni de « l'aluminium libre ». Ces formes ne sont pas les mêmes dans les deux extraits (voir rapports moléculaires SiO_2 / Al_2O_3).

Malgré les différences de formes extraites par ces deux extractifs, quelques points sont communs ; ils traduisent un état de fait lié au sol lui-même :

— la silice des extraits est abondante dans l'horizon de surface. De séries d'analyses non reportées ici, il ressort que la teneur en silice est surtout en relation avec la finesse des sables et la richesse en matières organiques (cas du 605).

— la silice est par contre en faible quantité dans l'horizon A_2. En B, on en retrouve surtout si l'horizon est argileux.

— l'alumine est accumulée en A_2, d'où un rapport SiO_2 /Al_2O_3 toujours faible dans cet horizon.

— En B, on ne retrouve de l'alumine que sous forme soluble à l'acide, c'est-à-dire différente de celle des horizons plus superficiels.

3 — Les profils hétérogènes

Quelques analyses chimiques sont présentées dans le tableau 8 : seuls les 3 types représentatifs d'une superficie importante seront étudiés ici :

— *Sable sur argile blanche kaolinique.* (profil n° 61 — fig : 13 centre Brenne) — l'argile est très pauvre en alcalins, de pH anormalement bas pour un taux de saturation dépassant 50 p. 100 ; en fait, ce pH bas est l'indice d'une acidification au cours de la réoxydation provoquée par la préparation de l'échantillon.

— *Sables gravillonneux argileux sur argile plastique vert pâle* (profil n° 615, fig. 13). Cette argile est saturée en Ca et relativement riche en potassium échangeable ; elle pourrait provenir, comme on l'a vu, du remaniement des argiles cénomaniennes glauconieuses. La capacité d'échange de la fraction $< 2\ \mu$ est relativement élevée (60 meq /100 g), l'analyse aux rayons X révèle la présence d'interstratifiés et d'illite dans la Kaolinite. L'analyse chimique totale ne la distingue pas des autres.

— *Sables alluvionnaires profonds et sains* (A 975) : si l'analyse granulométrique confirme l'hétérogénéité des dépôts, l'examen en place laisse apparaître des traces nettes de podzolisation, ne serait-ce que par la migration visible et confirmée par l'analyse, de la matière organique. Celle du fer est moins nette, mais on relève des concrétionnements et de véritables alios au niveau des dépôts plus grossiers. Sous friche, on décèle un horizon A_2 de podzol, de quelques centimètres, caractéristique par sa décoloration et sa structure particulaire.

D. — Essai d'interprétation pédologique

La description sommaire des sols de Brenne présentée en début de cette seconde partie a dégagé le caractère fondamental de ces sols, facilement décelable par la morphologie du profil en place : leur hydromorphie temporaire. Ce caractère, qui domine tous les autres, arrive à « homogénéiser » la Brenne.

TABLEAU 8

Analyses de profils hétérogènes

N°	Profondeur	Horizon	Argile (g %)	Mat. org. (g %)	C/N	Bases échang. (g/kg) Ca	Mg	K	Na	S (1)	T (2)	Taux sat. (%)	pH	Fer Deb.
						1° Hydromorphe								
						Centre Brenne								
61	0-30	sable	7,8	1,9		0,73	0,05	0,02	0,02	41,8	46	91	5,9	
	30-80	argile blanche	56			1,47	0,47	0,04	0,06	115,5	214	54	3,9	
						Bordure nord								
615	0-25	sable arg. gravillon.	26,4	1,68	9,1	3,55	0,19	0,11	0,02	197	198	100	7,2 (3)	
	25-80	Argile	78	0,46	11,7	6,28	0,80	0,17	0,11	390	390	100	7,6 (4)	
						2° Non hydromorphe								
						Sables alluvionnaires à différentes couches de sédimentation								
A. 975	0-25		5,0	2,5	13,4	1,45	0,10	0,08	0,017	82	75	100	6,4	1,37
	25-40		18	0,86	11,3	0,72	0,12	0,06	0,01	48,3	85	57	4,9	1,12
	40-60		12	1,34	12,2	0,35	0,07	0,04	0,01	25,2	59	43	4,9	1,59

(1) Somme des bases échangeables en meq/kg.
(2) Capacité de saturation.
(3) Traces $CaCo_3$.
(4) Calcaire néant.

Cependant, l'examen détaillé des profils, tant sur le terrain qu'à travers les résultats d'analyse décèle d'autres processus d'évolution pédologique antérieurs ou parallèles à la dégradation par l'hydromorphie. Avant d'aborder ce problème de l'hydromorphie, un paragraphe est donc consacré, dans les pages qui viennent, à la caractérisation du lessivage et de la podzolisation en Brenne et quelques lignes traitent du lessivage latéral

I — Lessivage ou podzolisation

Le problème ne se pose évidemment que pour les sols évolués suffisamment profonds à l'exclusion des dépôts successifs et peu épais de granulométries variées et des sols érôdés.

a) *Le climat*

Nous avons vu dans la 1re partie que le drainage climatique se situe en hiver : il est donc à priori favorable au lessivage. Le drainage calculé s'élèverait à 165 mm dans les limons et 265 mm dans les sables très perméables (Aubert, Hénin 1945 ; Dupuis, 1952). Les arènes gréseuses argileuses et acides ne sont pas à priori assez perméables pour permettre une podzolisation. Seuls les sables grossiers caillouteux alluvionnaires sont favorables à une telle dégradation.

b) *Courbes granulométriques*

— les courbes granulométriques homogènes de formes multiples incitent à penser que l'on trouve en Brenne toute la gamme possible de sols non calcaires, depuis le sol brun lessivé, le sol lessivé jusqu'au sol lessivé podzolique : les indices d'entraînement de l'argile peuvent même être particulièrement élevés et dépasser 10. Le type géographiquement le plus répandu et dominant de loin tous les autres entre précisément dans cette dernière catégorie : lorsque l'horizon « A_2 » est blanc, le profil prend une apparence podzolique, cette « apparence » n'est d'ailleurs pas en rapport avec l'indice d'entraînement de l'argile.

— Des bilans minéraux (Barshad I., 1958) ont été établis à partir des teneurs en argile des différents horizons d'un même profil en place, où le grès sous-jacent constitue la roche-mère et en dehors des zônes de colluvionnement possible qui risque de compliquer le phénomène. Même dans ces cas simples, les calculs aboutissent à trouver un excès d'argile dans l'horizon B ; ils soulèvent donc l'hypothèse à confirmer d'une possibilité de néosynthèse argileuse à ce niveau. Celle-ci est difficilement concevable en sol lessivé. Elle l'est difficilement en sol podzolisé sous nos climats tempérés actuels.

Si une érosion importante avait déblayé la partie supérieure des profils et faussé les bilans minéraux, en particulier dans les zônes actuellement planes, des profils enterrés seraient en contrepartie à découvrir. Jusqu'à présent les observations de profils de puits, de fosses, de déblais divers n'ont pas mis à découvert de tels profils.

c) *Critères chimiques.*

Les critères chimiques de distinction classique entre lessivage et podzolisation ne sont pas nets ici (Duchaufour, 1957).

— L'indice d'entraînement du fer n'a plus de signification en sol mal drainé, soumis aux remontées capillaires en été : il ne peut servir de critère.

— Les taux de matières organiques dans tous les horizons et les rapports C/N appartiennent au groupe des sols lessivés.

Mais ce lessivage n'est même pas certain : il peut s'agir d'une simple décomposition en place de matières végétales anciennes.

— les teneurs en bases échangeables dans les horizons A_2 et B font plutôt penser à un lessivage qu'à une podzolisation.

d) *Les argiles et les complexes*

La présence de silice en A_1 et B, celle d'alumine en A_2, l'existence de quartz très fin en A_2, celle de complexes colloïdaux condensés et d'aluminium libre en B, des types d'argiles différents en A et B sont autant d'indices en faveur de la podzolisation.

e) *Les profils sous forêts*

Les quelques profils étudiés sous forêts ne révèlent pas de différence fondamentale de composition chimique avec les sols étudiés sous culture extensive : on retrouve une apparence podzolique plus ou moins marquée de l'horizon A_2 moins désaturé que l'argile sous-jacente, un taux de matières organiques et un rapport C/N faibles en profondeur. Parmi les profils « homogènes » observés, l'établissement du bilan minéral montre qu'ici la teneur en argile et l'épaisseur de l'horizon B sont « normales ». L'excès d'argile en B se trouverait donc davantage sous les sols cultivés. Comme on l'a signalé précédemment, cette étude comparée sous forêt et sous prairie incite à penser que l'horizon d'accumulation argileuse est souvent en cours de consolidation, par opposition au grès argileux encore meuble qui constitue la roche-mère.

Ces études comparatives n'ont toutefois pas été menées assez systématiquement pour nous permettre d'être catégorique dans nos affirmations ; le problème soulevé reste à reprendre sous un angle différent de celui qui nous intéresse ici.

f) *Conclusion.*

Malgré un indice d'entraînement de l'argile élevé, la dégradation de cette argile dans l'horizon éluvial et une « apparence » podzolique, les sols actuels de Brenne ne semblent pas tendre vers des podzols. Tout au plus, faudrait-il admettre que la podzolisation est très ancienne et s'est faite sous un climat différent de celui d'aujourd'hui, antérieur au relief actuel, mais aucun sol fossile enterré n'a été découvert jusqu'à présent.

Un simple lessivage datant des forêts de feuillus qui recouvraient la Brenne au Moyen Age paraît plus vraisemblable ; mais l'argile que l'on trouve actuellement dans l'horizon B ne peut pas être uniquement une argile d'accumulation. Une hypothèse sera proposée plus loin après l'étude de l'hydromorphie.

En Brenne, les seuls profils qui portent des traces de podzolisation indiscutable sont les dépôts profonds de sables grossiers très perméables ; les niveaux les plus grossiers s'imperméabilisent actuellement par infiltrations humoferrugineuses qui cimentent les cailloux.

2 — Lessivage latéral

Comme on l'a vu dans les exemples (La claise type b, les Terres de Brandes), le lessivage latéral se traduit par un enrichissement en argile et éléments fins non colloïdaux vers les bas de pente. Mais l'hétérogénéité des dépôts primitifs est trop grande, et le degré d'évolution trop variable pour qu'on puisse trouver des caténas : les sols les plus argileux peuvent se rencontrer sur les sommets ; de véritables inclusions d'argiles à différents niveaux rompent toute continuité dans les pentes ; l'exemple de la Poupetterie ou de Tournavaux en sont des illustrations (voir page 155 à 157). Dans ces conditions, la mise en évidence quantitative du phénomène par des bilans minéraux est impossible.

Ce lessivage latéral existe cependant ; il est à la fois interne et superficiel.

α) *lessivage interne.* — Il se traduit d'abord par un mouvement de circulation préférentielle du fer ferreux à l'intérieur de l'horizon A_2 vers les bas de pente où la réoxydation ultérieure crée une zone de concrétionnements et même, à l'extême, la formation de petites plages limitées et discontinues d'alios de 1 à 3 cm d'épaiseeur.

Ce lessivage latéral en profondeur à l'intérieur de l'horizon A_2 facilite en même temps l'entraînement des argiles dispersées et leur dépôt au point le plus bas où l'excès d'eau ne partira plus que par évaporation ; le niveau d'affleurement de l'horizon d'accumulation argileuse remonte ainsi progressivement, et l'on aboutit à la formation d'horizons argileux très épais de 40 à 60 cm sous 2 à 3 décimètres de sables seulement.

β) *lessivage superficiel.* — Il s'agit ici d'un entraînement mécanique vers le bas des argiles dispersées et des limons. Le rapport C/N y est évidemment plus fort qu'ailleurs (16 à 17) mais ce chiffre élevé est beaucoup plus caractéristique de l'ennoyage que du colluvionnement ; on le retrouve en haut de pente dans des secteurs gorgés d'eau mais non colluvionnés (voir l'exemple précédemment cité sur les « Terres de Brandes »).

3 — L'Hydromorphie.

L'hydromorphie est en Brenne le caractère fondamental qui domine tous les autres ; il se superpose à une évolution antérieure, et marque profondément les dépôts hétérogènes qui ne constituent pas des « profils » au sens pédologique du terme.

Avant que ne soient abordées quelques considérations sur les « degrés d'hydromorphie », les différents « types » sont énumérés d'après l'origine et la cause de cet état.

a) *Les différents types d'hydromorphie*

De façon accessoire, on rencontre quelques sols à nappe permanente et véritable gley : ils sont situés en bordure de ruisseaux alimentés par des sources et au cours sinueux mal entretenu. C'est le cas de l'Yoson au bord duquel la nappe toujours très élevée entretient la formation d'un véritable An Moor caractéristique par sa couleur noire, sa structure grasse et son rapport C/N de 25 à 30.

De façon systématique, toutes les formes d'hydromorphie temporaire se rencontrent : les unes sont liées à des causes extérieures au sol, d'autres viennent du sol lui-même ; elles se superposent souvent.

α) *hydromorphie par cause extérieure.*

Ces causes ont été suffisamment développées pour pouvoir être simplement résumées ici :

— la topographie inorganisée, qu'elle soit naturellement ou artificiellement provoquée par des talus (déblais de fossés maintenus par des haies, barrages divers) maintient un ennoyage sur des surfaces importantes.

— la présence d'une couche imperméable sans exutoire, de surface irrégulière quoique profonde (grès ou horizon argileux) maintient gorgés d'eau en hiver les secteurs de sables pourtant parfaitement filtrants.

β) *Hydromorphie pour cause interne au profil lui-même.*

Elle existe à deux niveaux, dans la profondeur du profil et en surface.

A. *L'hydromorphie de profondeur.*

L'hydromorphie de profondeur apparaît en Brenne de deux types différents, l'un lié à la nature même peu perméable du dépôt, l'autre consécutif à une dégradation poussée du profil pédologique initial.

1. *L'hydromorphie texturale* est le lot de tous les dépôts argileux qu'ils soient du Sidérolithique de transport très désaturé (centre Brenne), du Sidérolithique issu du remaniement du Jurassique (nord et sud de Brenne) ou des argiles secondaires (argiles cénomaniennes, argiles à silex du Turonien en bordure nord et nord-ouest). Les profils ici ne présentent pas ou très peu de caractère de lessivage, les horizons ne sont pas tranchés — sauf lorsqu'il s'agit de dépôts différents — et l'hydromorphie est progressive, elle se traduit par des marbrures plus ou moins importantes sur 20 à 30 cm d'épaisseur.

Tels sont les cas des « profils hétérogènes » classés dans le tableau 8 et les figures 17 et 18 (profils 61, 615, 20, 6, etc.).

Lorsque l'argile imperméable est purement kaolinique (n° 61), l'hydromorphie est très peu visible puisqu'il n'y a pratiquement pas de fer dans le milieu. Elle se traduit par contre ailleurs par une marmorisation nette et la présence de concrétions autour du moindre caillou. Dans le cas des argiles vertes cénomaniennes (n° 615) elle se confond à première vue avec une marmorisation très ancienne, géologique, telle qu'on l'a retrouvée à 6 mètres de profondeur dans les fouilles du château de Vendœuvres (cf. annexe I). Mais elle se dépiste facilement en période pluvieuse dans ses premiers centimètres au contact des sables gravillonneux sous-jacents, par la présence d'un gley caractéristique par sa couleur, son odeur et un rapport C/N élevé (14 à 16).

2. *L'hydromorphie de dégradation.* a plusieurs origines qui se succèdent dans le temps pour accentuer et accélérer le phénomène.

— *L'hétérogénéité des dépôts* à l'échelle même de la parcelle, avec des zones voisines plus ou moins grossières et des niveaux argileux discontinus a probablement entravé dès le début, même en pleine pente, l'écoulement naturel des eaux : les exemples de Tournavaux ou de la Poupetterie déjà cités (voir page 155 à 157) sont une illustration de cette hétérogénéité.

— *L'intervention humaine* a dû accélérer cette tendance naturelle à l'hydromorphie : des observations de profils comparés sous forêts anciennes — qui sont des forêts

de feuillus — et sous terres de cultures plus ou moins abandonnées, ont permis de confirmer que le grès se laisse facilement pénétrer par les racines d'arbre et par conséquent par l'eau : celles-ci maintiennent une épaisseur importante de roche relativement meuble sous un sol qui reste sain partout où la topographie ne maintient pas l'eau stagnante.

La disparition des forêts a provoqué le blocage, la consolidation de l'arène, entraînant ainsi la remontée du niveau imperméable de base ; cette remontée, localement très variable avec l'importance de l'enracinement, a accentué en sous-sol l'irrégularité des affleurements de grès durci et facilité la multiplication des « nappes perchées ».

Cette déforestation, qui est certaine sur le plan historique, trouve sa confirmation dans l'existence de racines fossiles ou plus souvent de « dendrites » d'oxydes de fer systématiques au sein des grès actuellement les plus durs : l'arène n'a plus alors que 5 à 10 cm d'épaisseur.

— *L'évolution progressive d'un sol pauvre en bases* a abouti parallèlement à la formation d'un horizon d'accumulation relativement beaucoup plus enrichi en argile qu'en cations (voir tableau 4) : sa faible saturation a entraîné la dispersion des colloïdes argileux et favorisé sa compacité. L'évolution a abouti à faire de cet horizon d'accumulation argileuse un second niveau imperméable plus superficiel que le grès : les sols deviennent alors peu épais, limités aux horizons A_1 et A_2 déjà très appauvris, engorgés d'eau l'hiver et très secs l'été.

— *L'ancien horizon éluvial* A_2 devient, au contact de cette nouvelle zone imperméable relativement peu profonde constituée par l'argile, un niveau d'engorgement temporaire et le siège de réductions intenses d'autant plus importantes que d'anciennes racines apportent les éléments organiques favorables à la solubilisation du fer et du manganèse (Bétremieux, 1951 ; Lossaint, 1959). Cette zone devient défavorable aux nouvelles racines des cultures qui ne s'y développent plus. Dans cette masse devenue inerte et blanchie, les oxydes de fer reprécipitent localement en période sèche avec quelques concrétions ferro-manganiques isolées. L'altération de l'argile elle-même même peut provoquer la libération de gels de silice et d'alumine (Duchaufour, 1960) qui enrobent largement les grains de sables pour former une boue colmatée l'hiver, un ciment extrêmement compact l'été : à l'obstacle chimique pour les racines, s'ajoute un obstacle mécanique et physique qui accélère la dégradation et rend cet horizon de moins en moins facilement pénétrable. L'horizon B sous-jacent se marmorise, mais il reste relativement plus perméable, structuré en très grosses mottes qui se maintiennent séparées par les racines de l'ancienne végétation fossile ou celle de la végétation naturelle actuelle adaptée aux conditions d'asphyxie(agrostis et molinie).

Du sol brun lessivé et peut être lessivé podzolique sous forêt de feuillus on est passé insensiblement, sous lande à éricacées ultérieurement défrichée, au sol ocre podzolique puis podzolique progressivement hydromorphe ; pour aboutir au sous groupe des pseudo-gleys à hydromorphie de profondeur de la classe des sols hydromorphes (Aubert, Duchaufour, 1960).

A partir d'un horizon éluvial plus ou moins épais qui peut se gleyifier sur toute son épaisseur ou seulement vers sa base, toutes les étapes se rencontrent depuis la faible marmorisation jusqu'au stagnogley. Elles paraissent liées à l'exploitation humaine : la lande mal défrichée, mal réensemencée, destinée au pacage très extensif est souvent très dégradée (exemple : A 925 dans les analyses).

Mais les conditions locales de drainage sont aussi très essentielles. Elles ne sont

d'ailleurs pas exclusivement liées à la topographie naturelle, mais également soumises aux variations très localisées et de faible amplitude dans la granulométrie initiale et la formation de l'horizon imperméable.

A l'hétérogénéité initiale se superpose donc une hétérogénéité très complexe de l'évolution des dépôts à l'échelle de la parcelle sans qu'aucune loi systématique de répartition ne puisse être tirée.

B. — *L'hydromorphie superficielle.*

L'hydromorphie superficielle — en dehors des cas d'ennoyage par accident topographique — est consécutive à une imperméabilité accentuée de la couche arable, par absence marquée de stabilité structurale à l'eau : elle est liée en grande partie à la présence excessive d'éléments fins non colloïdaux. Elle se rencontre dans deux types de sols pédologiquement différents :

— soit des colluvionnements de bas de pente, enrichis en argile mais aussi en éléments très fins non colloïdaux (limons), trés défavorables au maintien d'une structure stable ; la surface reste ainsi gorgée d'eau bien au-dessus du niveau maximum d'ennoyage maintenu par l'obstable topographique à l'écoulement.

— soit de dépôts en place éocènes riches en limons et faiblement lessivés.

Les deux types se distinguent nettement non seulement à l'examen sur le terrain mais aussi sur les analyses granulométriques (fig. 21).

Le premier est assez systématique des bas de pente ; il est lié à la situation topographique du lieu. Le deuxième, déjà signalé, correspond à un secteur géographique assez bien défini ; il se rencontre préférentiellement sur les zônes du centre Brenne assez périphériques (Nord-Ouest et Sud-Est).

Pratiquement le comportement est identique dans les deux cas, l'instabilité de la structure constitue un obstacle superficiel qui maintient un sous-sol sec au-dessous d'un sol gorgé d'eau ; le gley est intense en surface, des graviers friables d'oxydes de fer occupent la masse ; aucune culture n'arrive à « tenir » en dehors des pacages d'agrostis et de houlque laineuse mêlés de quelques pieds de trèfle blanc et de lotier.

γ) *Hydromorphie complexe.*

Les cas d'hydromorphie interne uniquement superficielle sont exceptionnels. Ils se superposent par contre souvent à l'hydromorphie de profondeur et se compliquent de causes externes essentiellement topographiques.

b) *Les différents degrés d'hydromorphie*

Les différents types d'hydromorphie sont relativement faciles à préciser lorsqu'on prend pour critère de différenciation l'origine et la cause mêmes du comportement anormal du sol vis-à-vis de l'eau. Mais pratiquement cette classification n'a pas grand intérêt à partir du moment où l'on cherche à mettre en valeur des sols « endohydromorphes ».

L'aspect fondamental ici est celui du « degré d'hydromorphie » avec ses conséquences sur l'importance de la dégration du sol. Parallèlement, le problème à résoudre est celui du devenir du sol hydromorphe sous l'influence des différentes techniques d'amélioration.

Cet aspect ne peut donc pas être traité avant l'étude plus approfondie du com-

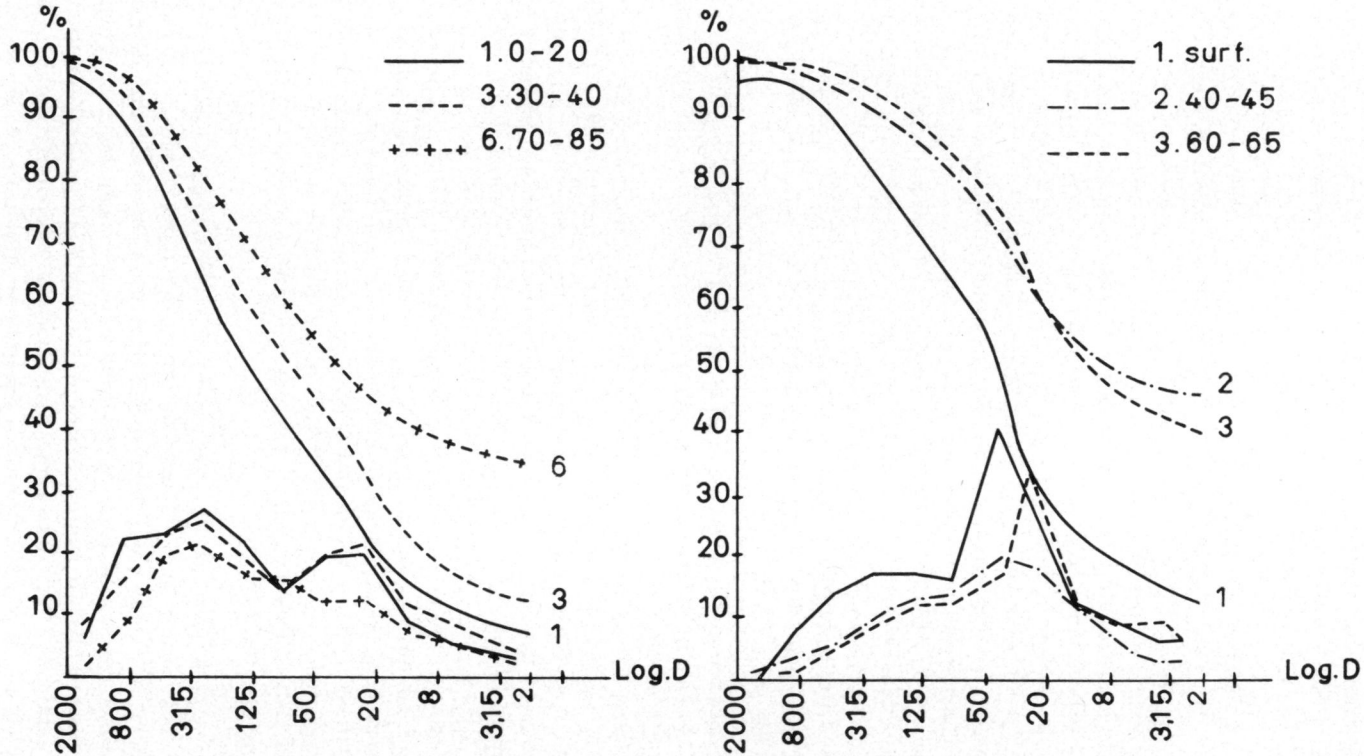


FIG. 21. — *Courbes granulométriques : Les deux types d'hydromorphie superficielle*

Colluvionnement : S n° 16 Ciron — Le Champ de Migné,
Profil limoneux : S n° A 27 Martizay — La Bertellerie.

portement hydrique de ces sols, qui fait l'objet de la 3e partie de cette étude Trois points peuvent simplement reprendre ici quelques remarques précédemment notées :

— *La décoloration*, les marbrures, les concrétions ferromanganiques sont bien un indice de gleyification temporaire, telle qu'elle a souvent été décrite (CROMPTON E., 1952 — bibliographie présentée par PLAISANCE, et Van der MAREL, 1960). Ce sont l'aboutissement d'une dégration du sol en anaérobiose partielle selon des mécanismes depuis longtemps étudiés (BLOMFIELD C., 1950 ; BÉTRÉMIEUX, 1954, etc.).

Mais cet aspect morphologique n'est pas en rapport avec l'importance de la dégradation elle-même : il reste subordonné, entre autres. à la nature du matériau originel plus ou moins ferrugineux (les bancs de Kaolinite pure ne peuvent être « décolorés ») ZAKOSEH H. signalait déjà en 1954 que l'intensité et la forme de la coloration n'étaient pas des indices de degré d'ennoyage.

Cet aspect se complique en Brenne du fait que la marmorisation est visiblement « fossile » dans les grès et la plupart des argiles : la limite entre les hydromorphies actuelle et géologique est souvent difficile à saisir.

D'autres critères morphologiques paraissent plus valables : ce sont ceux qui traduisent l'état structural et le comportement radiculaire, ils seront précisés ultérieurement.

— *La saturation en bases* relativement élevée de l'horizon A_2 est un des critères qui, comme on l'a vu, constitue une restriction essentielle à la caractérisation de sols podzoliques en Brenne.

En fait, l'imperméabilisation de l'horizon B arrête le lessivage à son sommet et l'accumulation des bases provenant de la minéralisation actuelle de la matière organique ne peut se faire qu'au sein de l'ancien horizon éluvial A_2 : La saturation de l'horizon blanchi devient, en l'absence d'interventions humaines, un indice certain d'hydromorphie : BLOOMFIELD, dès 1949, signalait que les horizons gleyifiés des podzols atteignaient la neutralité. Des travaux polonais plus récents (SINTA, 1960) semblent précisément montrer qu'une gleyification temporaire aboutit à la formation d'un horizon blanchi, d'apparence podzolique, mais à réaction neutre ou alcaline.

Malheureusement si l'existence d'une relation entre le taux de saturation de l'horizon gleyifié et l'importance de l'hydromorphie est possible, elle ne peut à priori être mise en évidence sur des sols cultivés, même partiellement, qui ont été plus ou moins marnés le siècle précédent. Le lessivage latéral interne complique également les circuits possibles.

— *L'indice d'entraînement de l'argile* souvent anormalement élevé entre les horizons A et B, la présence en profondeur de formes phylliteuses plus ou moins bien définies, font penser, comme on l'a vu précédemment, à une possibilité de néosynthèse argileuse à ce niveau. Celle-ci est difficilement concevable, à l'échelle du phénomène observé, dans le cadre d'une simple dégradation par podzolisation sous nos climats tempérés. Par contre, une hydromorphie temporaire accusée, datant de plusieurs siècles, avec ses extrêmes d'anaérobiose prolongée et de dessiccation poussée — semblerait mieux fournir des conditions d'altération énergique. Des travaux russes (VERIGINO, 1953) signalent en effet dans ce sens l'augmentation du taux de colloïde peptizable par gleyification.

4. — Conclusions

Les sols de Brenne entrent dans la classe des sols hydromorphes continentaux de la classification française (Aubert, Duchaufour, 1956). La plupart sont des sols à hydromorphie temporaire liée à la nature du sol lui-même. Cette hydromorphie constitue le caractère fondamental, qui domine tous les autres et complique les critères habituellement recherchés pour préciser les types d'évolution pédologique.

De nos études axées sur une mise en valeur et par conséquent trop limitées sous le seul aspect pédologique, il se dégage, pourtant quelques lois d'ensemble.

Schématiquement, les sols de Brenne peuvent se classer en 2 groupes.

— l'un contient tous les dépôts, d'origine sidérolithique ou non, mais remaniés d'une façon telle par les courants et l'érosion qu'on ne décèle aucune évolution préalable à l'hydromorphie actuelle.

— l'autre comprend au contraire les sols en place qui visiblement ont subi une évolution antérieure ; ils présentent un horizon éluvial, d'apparence podzolique. Mais la dégration par l'hydromorghie ne permet pas, tout au moins avec les données dont on dispose, de préciser de façon certaine s'il s'agit d'un lessivage ou d'une podzolisation. Malgré un taux d'argile très élevé en profondeur, la présence de complexes aluminosiliciques mal définis, d'argiles de types un peu différents et cette apparence podzolique, les caractères chimiques et physicochimiques ne sont pas ceux de sols podzoliques. D'ailleurs, la perméabilité limitée de la roche-mère argileuse et acide ne semble pas — sauf cas exceptionnel — pouvoir permettre une podzolisation sous nos climats actuels.

Une podzolisation très ancienne sous climat chaud et humide de la fin du tertiaire paraît peu vraisemblable : les profils suivent le relief actuel et aucun sol enterré n'a été découvert.

Un lessivage initial paraît plus normal et les caractères qui peuvent donner aux sols de Brenne une apparence podzolique ne seraient en fait que les conséquences directes et immédiates des conditions actuelles d'hydromorphie.

Cette hypothèse est d'autant plus probable que les caractères de podzolisation « apparente » se retrouvent sur des dépôts granulométriquement hétérogènes.

(à suivre)

Ann. agron., 1963, **14** (2), 195-218

631.445 (44)

ÉTUDE DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS DE BRETAGNE

F. GUITIAN-OJEA et M. COPPENET

Centro de Edafologia y Biologia vegetal, Santiago de Compostela (Espagne) ;
Station d'Agronomie, Quimper (Finistère)

SOMMAIRE

Seize profils de sols de la Bretagne occidentale ont été décrits en détail et analysés aux points de vue granulométrique et chimique. Le choix de ces sols a été fait en fonction de la couverture végétale et des roches-mères qui sont toutes de nature acide mais, cependant, à des degrés divers. La classification, faite d'après la nomenclature de KUBIENA, répartit les sols étudiés entre les types : terres brunes, terres brunes podzolisées, podzols, plastosols (Braunlehm, Rotlehm) et vega brune.

Une attention particulière est portée aux différentes formes d'humus rencontrées.

I. — INTRODUCTION : CLIMAT, GÉOLOGIE, RELIEF

Comme travail préparatoire à la réalisation d'une cartographie détaillée des sols de Bretagne, nous considérons qu'il est indispensable de caractériser d'une manière claire, tant morphologiquement que par les analyses de laboratoire, les principaux types de sols existants dans cette région. Jusqu'à présent les descriptions et les études en ce sens n'ont pas été suffisantes pour permettre une classification systématique des principaux sols.

Au cours des dernières années la Station d'Agronomie de Quimper a effectué quelques études et cartographies portant sur une ou plusieurs communes. Le but de ces études était principalement orienté vers l'évaluation des possibilités agricoles des terroirs considérés mais, à l'occasion, les types pédologiques principaux ont été décrits. C'est le cas pour la commune de Loguivy-Plougras (C.-du-N.) dans le massif granulitique de Plouaret et les schistes de Saint-Lô en alternance avec des amphibolites (ROBELIN, COPPENET, HELIAS, 1957), de la région de

Gourin (Morbihan) sur granulites, schistes de St-Lô (Briovériens), sables et galets tertiaires (COPPENET, HELIAS, 1958 *a*), de la région Lorient-Hennebont (Morbihan) sur granites, granulites et roches métamorphiques (COPPENET, 1962). Enfin, étant donné l'importance de la forme de l'humus pour la systématique des sols, un travail a été fait concernant spécialement le pH et le rapport Carbone sur Azote des horizons A_0 et A_1 sous diverses formations végétales (COPPENET, HELIAS, 1958 *b*). Il est toutefois nécessaire de continuer dans cette voie en adoptant la nomenclature de KUBIENA comme cela est le cas dans la majeure partie de l'Europe (KUBIENA, 1953).

Ainsi, les conceptions de DUCHAUFOUR sur les diverses formes d'humus restent valables et coïncident, d'une manière générale, avec celles établies par KUBIENA mais il existe d'autres formes intermédiaires dont la nomenclature n'est pas encore généralisée en France, c'est le cas, par exemple, du moder-mulliforme (DUCHAUFOUR, 1961).

Climat

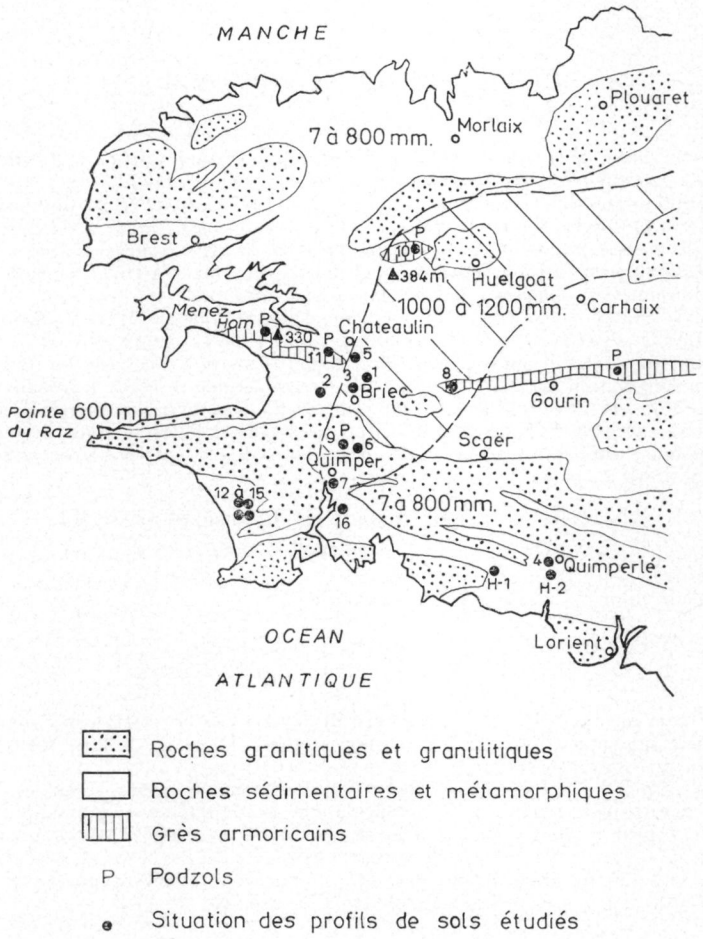
Le climat de la Bretagne occidentale (département du Finistère, plus une partie des départements des Côtes-du-Nord et du Morbihan) est un climat à caractère océanique très marqué. L'amplitude des températures est limitée, les pluies sont assez bien réparties avec cependant un maximum entre octobre et mars. Dans l'intérieur des terres, soit à l'intérieur de la ligne pointillée portée sur la carte C ci-jointe, la pluviométrie annuelle dépasse 1 000 mm et peut atteindre 1 200 mm. Par contre, dans l'extrême ouest (région de la Pointe-du-Raz), la pluviométrie est inférieure à 600 mm. Les régions côtières septentrionales bordant la Manche ne reçoivent que 6 à 700 mm d'eau, celles bordant l'océan Atlantique au sud n'en reçoivent que 7 à 800 mm. Le nombre moyen annuel de jours de pluie est de 160 à Quimper. La température moyenne annuelle est comprise entre 11 et 12° pour une grande partie de la Bretagne. La moyenne des températures des mois les plus froids est comprise entre 5° et 6°5, celle des mois les plus chauds entre 16°5 et 18°5. L'éloignement du littoral et l'altitude, quoique faibles, occasionnent cependant une certaine variation des températures. La neige est inconnue sur les régions côtières, les minima descendent rarement au-dessous de — 5° et les maxima dépassent rarement + 30°. Le nombre d'heures d'insolation est de 1 750 à Quimper (moyenne des 9 dernières années).

La quantité d'eau drainante est importante puisque, d'après les lysimètres de Quimper, elle varie de 4 à 500 mm pour une hauteur d'eau tombée de 1 000 mm en moyenne. Il s'agit de lysimètres de un mètre de profondeur, cultivés et remplis d'une terre granitique de bon pouvoir filtrant.

Géologie

L'extrémité occidentale du massif Armoricain est un massif hercynien réduit à l'état de pénéplaine dès la fin de l'ère primaire. Le plissement alpin du milieu du tertiaire ne l'affecta que faiblement, aussi son altitude moyenne (104 m) est très faible. Ce léger soulèvement provoqua cependant un recreusement des vallées, si bien qu'aujourd'hui, le vieux socle armoricain est-il fortement découpé de vallées

aux formes jeunes. Enfin, l'érosion termina la sculpture du relief actuel. Les points culminants n'atteignent pas 400 m d'altitude, le point le plus élevé est le signal de Toussaines (384 m) près du podzol n° 10 (carte C). Signalons également le Menez-Hom (330 m), sommet gréseux où un podzol s'est développé sous la lande d'ajoncs et d'éricacées.



CARTE C — *Carte de situation.*

Les roches les mieux représentées sont les granites et granulites de types variés puis les schistes primaires, siluriens, dévoniens et carbonifères. Au contact des massifs cristallins on trouve des zones métamorphiques (schistes micacés et feldspathisés), des gneiss, des micaschistes, enfin des grès siluriens et des quartzites

dévoniennes. Dans quelques petites zones existent des roches plus riches en bases de type amphibolitique.

En région granitique, les sommets sont arrondis en forme de dômes tandis que les sommets des montagnes Noires et des monts d'Arrée, constitués par des quartzites et des schistes dévoniens très durs, présentent des arêtes vives. Les régions schisteuses, telles que le bassin carbonifère de Châteaulin, ont un relief beaucoup plus mou.

II. — MÉTHODES EMPLOYÉES

Nous avons choisi, dans la moitié sud du Finistère, un certain nombre de sols nous paraissant les plus caractéristiques de par la roche-mère et la couverture végétale.

Les échantillons des différents horizons des profils ont été prélevés en portant un intérêt spécial à la délimitation des diverses couches d'humus. Une description détaillée a été faite dans chaque cas et, dans la mesure du possible, nous avons identifié la végétation.

Après dessiccation à l'air des échantillons et tamisage au tamis à trous ronds de 2 mm de diamètre, les déterminations suivantes ont été faites au laboratoire :

1°) Analyse granulométrique par la méthode densimétrique de Mme S. MÉRIAUX adaptée aux sols de Bretagne par L. DUVAL (S. MÉRIAUX, 1954 ; DUVAL, 1959).

2°) Mesure du pH dans l'eau et dans KCl 0,1 N au pH-mètre à électrode de verre et avec un rapport Terre sur solution de 1/2,5. Agitation électromagnétique pendant la mesure.

3°) Mesure du pH (P. nitro) grâce à une solution tampon de paranitrophénol en présence de KCl et suivant la méthode de F. GUITIAN-OJEA proposée pour la détermination du pouvoir tampon des sols. Ce pouvoir tampon est désigné dans les tableaux de résultats par la lettre β et représente un indice quantitatif du pouvoir tampon des sols.

$$\beta = \frac{d\,H}{d\,pH} = \frac{\text{m. éq. d'acide ou de base/100 g de sol}}{\text{variation de pH}}$$

Cette valeur étant calculée d'après la relation :

$$\beta \text{ moyen} = \frac{10\,(7{,}0 - pH\ s)}{7{,}0 - pH\ i}$$

où pH s = pH (p. nitro) et pH i = pH (KCl 0,1 N) (GUITIAN-OJEA et MUÑOZ-TABOADELA, 1960).

4°) Matière organique totale par perte au feu, azote par Kjeldahl, carbone par oxydation sulfochromique suivant ANNE (1945).

5°) Composition du complexe d'échange et capacité totale d'échange pour les cations par la méthode au chlorure de baryum et à la triéthanolamine de MEHLICH avec la modification proposée par F. GUITIAN pour le dosage de l'aluminium. (MEHLICH, 1948 ; ROBERTSON, 1950 ; GUITIAN-OJEA, 1958).

6°) Les oxydes de fer libres ont été dosés dans certains profils par extraction à l'hydrosulfite de soude, $S_2O_4Na_2$ à 4 p. 100, suivant MITCHELL et MACKENZIE (1954).

Abréviations utilisées.

A : Argile p. 100. Tous les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés en p. 100 de terre fine séchée à l'air.
L : Limon, 2 à 20 μ.
Lg : Limon grossier, 20 à 50 μ.
Sf : Sable fin, 50 à 200 μ.
Sg : Sable grossier, 200 à 2 000 μ.
M.O. : Matière organique totale p. cent.
C/N : Rapport carbone sur azote.
β : Pouvoir tampon (Poder de amortiguacion : F. GUITIAN-OJEA).

Complexe d'échange : H, Ca, Mg, K, Na et Al exprimés en milliéquivalents par 100 g de terre fine.
S : Somme des cations.

T : Capacité totale d'échange pour les cations en milliéquivalents par 100 g de terre fine.
V : Pourcentage de saturation = S × 100/T.
Fe : Fer libre exprimé en Fe_2O_3 p. cent de terre fine.

III. — RÉSULTATS OBTENUS

La situation et la description des seize coupes de sols étudiées seront données, ainsi que les résultats analytiques, dans les tableaux qui suivent. La présentation en sera faite sol par sol et dans l'ordre ci-dessous déterminé suivant la classification de KUBIENA. Pour six profils nous avons jugé utile d'effectuer une représentation graphique indiquant les variations de Fe, M.O., T et β × 10 en fonction de la profondeur. (Voir les graphiques de 1 à 6.)

SÉRIE PODZOLIQUE

A. — *Terres brunes.*

N° 1	— sur phyllites	(Gouézec)
N° 2	— sur schistes	(Quilinen)
N° 3	— limon brun « terrifié »	(St-Venec)

B. — *Terres brunes podzolisées.*

N° 4	— sur schistes	(forêt de Carnoët près Quimperlé)
N° 5	— sur phyllites et quartzites	(Trois-Fontaines)
N° 6	— sur granulite	(Stangala)
N° 7	— sur limon granitique	(Kerustum près Quimper)
N° 8	— sur quartzites	(Trégourez)

C. — *Podzols humo-ferrugineux.*

N° 9	— sur granulite	(Stangala)
N° 10	— sur grès et quartzites	(St-Michel-de-Brasparts)
N° 11	— sur grès et quartzites	(Nord de Briec)

PLASTOSOLS

N° 12	— Braunlehm « terrifié » sur amphibolite	(forêt de Peumerit)
N° 13	— Braunlehm pseudo-gleyifié sur amphibolite serpentinisée	(Pouldreuzic)
N° 14	— Rotlehm sur amphibolite	(Peumerit)
N° 15	— Rotlehm « terrifié » sur serpentine	(Peumerit)

SOLS ALLUVIAUX NON GLEYIFIÉS

N° 16	— Vega brune allochtone	(terrasse de l'Odet, près Quimper)

IV. — DISCUSSION

A. — Terres brunes

Dans la série podzolique on peut apprécier le degré d'évolution des sols en fonction du matériau de départ. Le sol n° 1 (Gouézec), formé sur schistes argileux, représente une terre brune limoneuse, typique pour cette roche. Il n'existe aucune différence marquée dans le profil pour la capacité d'échange, ni pour la perte au feu, ni pour la teneur en argile (voir le graph. 1). Seul le degré de saturation V est nettement plus élevé dans l'horizon supérieur comme conséquence des cations apportés par la culture. Le pH y est plus élevé également. L'humus est actuellement de type Mull mais il s'agit vraisemblablement d'un Moder « mullifié » par la culture, de rapport C/N très voisin de 10.

PROFIL N° 1

TERRE BRUNE SUR PHYLLITES

Situation : Gouezec — Bassin carbonifère de Châteaulin — Altitude 120 m.
Pente faible, drainage normal.
Végétation : Sol cultivé.
Description : 0-60 : Horizon brun, minéral, sans distinction d'une couche organique à l'horizon supérieur, homogène, grumeleux, structuré, colonisé par les insectes et mélangé avec les colluvions de la roche-mère.
60-80 : Brun plus foncé, aspect de limon avec grandes galeries d'animaux, compact. Colluvion passant insensiblement à la roche altérée (horizon plus humide que le précédent le jour de l'examen).
80-300 : Phyllite altérée complètement en plaquettes par altération in situ.

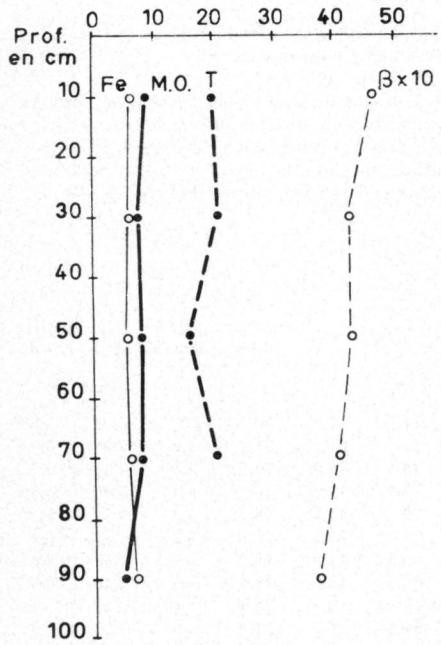
Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
0-20.....	15,8	33,4	10,8	6,5	17,7	5,65	5,05	6,10	4,62	8,6	10,3	6,3
20-40.....	16,0	34,0	12,0	6,1	17,6	4,50	4,20	5,82	4,22	6,6	9,9	6,5
40-60.....	13,5	36,5	11,0	5,9	17,3	4,6	4,28	5,85	4,23	7,6		5,9
60-80.....	12,0	37,0	10,5	5,1	18,6	4,45	4,05	5,80	4,07	7,5		7,2
> 80.....	9,8	42,0	11,2	6,4	18,3	4,50	4,40	6,02	3,77	4,8		7,0

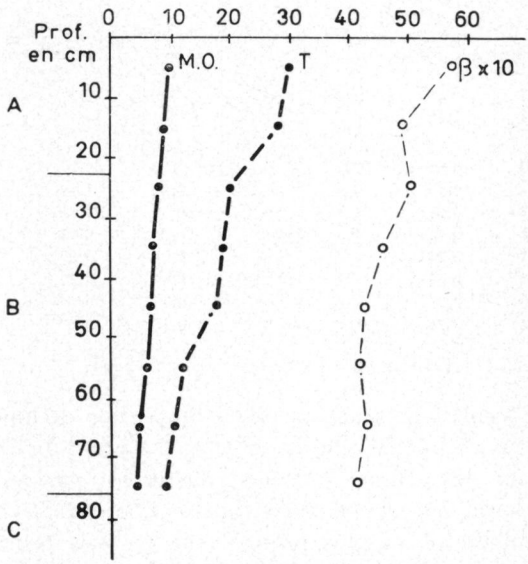
Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-20.....	15,9	3,01	0,10	0,36	0,26	3,73	19,7	14	2,75
20-40.....	20,1	0,50	tr	0,08	0,04	0,62	20,7	3	2,00
40-60.....	15,5	0,25	tr	0,07	0,05	0,37	15,9	2	1,50
60-80.....	20,1	tr	tr	0,07	0,04	0,11	20,2	1	2,50

Le sol n° 2 (Quilinen), situé en bordure d'un champ, est une terre brune limoneuse. L'action de l'homme affecte seulement les 10 premiers centimètres du profil



GRAPHIQUE 1. — *Sol N° 1. — Terre brune sur phyllites* (Gouézec)



GRAPHIQUE 2. — *Sol N° 2. — Terre brune sur schistes.* (Quilinen),

(pH et degré de saturation plus élevés). Cette action se manifeste aussi sur le pouvoir tampon β.

PROFIL N° 2

TERRE BRUNE SUR SCHISTES

Situation : Quilinen : LANDREVARZEC (Schistes de St-Lô). Altitude 120 m.
Terrain horizontal, bien drainé.
Végétation : Sol cultivé.
Description : A 0-20 : Brun foncé, à humus mulliforme, légèrement structuré et en mélange avec les composants minéraux qui passent insensiblement à l'horizon inférieur.
(B) 20-80 : Brun ocre sans transition nette, limoneux avec quelques petites colluvions de schistes.
80 à plus de 150 : Continuation de l'horizon antérieur qui devient plus clair avec la profondeur jusqu'à la rencontre du schiste altéré (Horizon C).

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
0-10.....	14,8	20,7	17,5	17,3	10,1	5,4	5,05	5,90	5,64	9,86	11,2	6,12
10-20.....	12	23,8	17,5	10,5	21,2	5,0	4,52	5,80	4,84	8,46	11,2	6,44
20-30.....	10	26	19	10,8	19,6	4,9	4,45	5,72	5,02	7,15		6,99
30-40.....	5	28,8	24,4	14,8	15,2	4,7	4,50	5,80	4,48	6,15		7,22
40-50.....	2,5	27,5	28	11,5	16,9	4,8	4,52	5,95	4,23	6,45		6,21
50-60.....	3,2	25,8	27	12,1	17,8	4,7	4,55	6,0	4,08			5,44
60-70.....	3	26	26,5	11,9	18,8	4,6	4,62	6,0	4,20	3,14		4,61
70-80.....	2	26	26,2	13,6	18,4	4,7	4,60	6,02	4,08	4,05		4,34
80-90.....	5	22	23	15	26,5	4,6						4,43
90-100.....	4	20,2	24,8	21,7	22,9	4,3						4,52

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-10.....	23,9	5,02	0,25	0,4	0,80	6,47	29,3	22	4,00
10-20.....	26,4	0,75	0,05	0,2	0,40	1,40	27,8	5	4,15
20-30.....	18,9	0,25	tr	0,2	0,40	0,85	19,8	4	5,75
30-40.....	17,7	0,25	tr	tr	0,20	0,45	18,3	4	5,25
40-50.....	17,3	0,25	tr	tr	0,04	0,29	17,6	2	2,25
50-60.....	11,2	0,25	tr	tr	0,04	0,29	11,5	3	2,25
60-70.....	9,9	0,25	tr	tr	0,04	0,29	10,2	3	2,90
70-80.....	8,2	0,25	tr	tr	0,18	0,43	8,6	5	2.25

Le sol n° 3 (St-Venec), présente une forte proportion de limon (2 à 20 μ) avec une granulométrie très voisine de celle du sol n° 1. Il s'agit d'un limon brun « terrifié » allochtone, provenant des collines voisines constituées par les grès armoricains et les quartzites ; les graviers des horizons supérieurs du profil en font foi.

Les horizons minéraux les plus profonds de ces sols bruns sont très acides puisque leur pH (H_2O) est voisin de 4,5, leur teneur en Ca échangeable égale à 0,25 méq pour 100 g et leur pourcentage de saturation en bases compris entre 1 et 3. Nous verrons, par la suite, que ces valeurs sont approximativement les mêmes pour les terres brunes podzolisées et pour les podzols vrais.

PROFIL N° 3

LIMON BRUN « TERRIFIÉ »

Situation : Chapelle de St-Venec — Rte Quimper à Brest — Schistes recouverts de limon. Altitude 110 m — Terrain horizontal, bien drainé.

Végétation : Sol cultivé.

Description : 0-40 : Horizon brun clair, légèrement structuré avec présence de graviers arrondis de quartzite.
40-80 : Continuation de l'horizon supérieur qui devient progressivement plus argileux, jusqu'à la rencontre de la phyllite altérée. Les graviers sont de dimensions irrégulières et atteignent 6 à 8 cm. Horizon sans structure et brillant à l'état humide.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-40	12,0	38,0	13,0	8,4	15,7	5,85	5,10	6,28	3,80	8,9	11,3
40-80	16,5	36,5	12,5	6,4	15,5	5,05	4,30	6,12	3,26	6,3	

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-40	9,09	7,78	0,50	0,20	0,26	8,74	17,8	49	0,85
40-80	9,09	1,50	0,05	0,10	0,10	1,77	9,8	18	2,05

B. — Terres brunes podzolisées

Dans la forêt de Carnoët (n° 4), on peut observer une terre brune contenant une forte proportion de sable grossier. Le couvert d'une futaie de hêtres maintient un bon degré de saturation (V = 17) dans l'horizon supérieur à cause des cations apportés par les restes de la végétation. Il existe une forte différenciation de l'horizon A_0 sous la couche abondante de litière ; cet horizon (3 à 5 cm) contient une grande quantité de matière organique sous la forme d'un Moder grossier caractérisé par une capacité d'échange élevée (T = 59 méq/100 g). Cette différenciation est accusée également par le pouvoir tampon (β) qui baisse fortement et brutalement en arrivant dans l'horizon minéral de 5,95 à 3,88. La topographie horizontale fait que le drainage est difficile dans certaines zones, aussi, se produit-il des gleyifications locales favorisées par l'augmentation de la fraction limoneuse avec la profondeur (pseudo-gleyification).

Les sols n° 6 (Stangala), n° 7 (Kerustum) et n° 8 (Trégourez) représentent l'évolution constituant le climax pour les régions considérées ici. Une légère augmentation du degré de saturation en bases existe dans les horizons supérieurs comme résultat de l'équilibre sol-végétation.

Dans le cas n° 6, on observe une légère migration des oxydes de fer libres et une augmentation de l'aluminium échangeable entre 15 et 45 cm. Ces deux phénomènes indiquent une tendance à la formation d'un horizon Bs, non différenciable morphologiquement, mais qui existe cependant puisqu'on remarque la présence de sables de quartz lavés dans l'horizon supérieur.

PROFIL N° 4

TERRE BRUNE PODZOLISÉE SUR SCHISTE

Situation : Forêt de Carnoët près Quimperlé — Altitude 70 m.
Topographie horizontale.
Végétation : Futaie de *Fagus, Quercus, Rhamnus, Ilex, Hedera, Lonicera, Pteris.*
Description : 0-3 : Litière de hêtre et chêne abondante et bien délimitée.
3-5 : Couche de fermentation nette, bien développée ayant l'aspect de café moulu,un peu plus légère.
5-7 : Couleur foncée, brunâtre, mélangée avec la couche minérale limoneuse. Légèrement cendreuse par endroit.
7-20 : Horizon minéral, ocre, plastique et gleyifié dans certaines zones.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
3-5						3,7	3,3	4,8	5,95	30,6	19,3
7-20	11,5	17,0	14,5	8,1	33	4,25	3,7	5,7	3,88	5,9	25,9

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
3-5	49,9	4,26	3,7	1,3	0,7	9,96	59,0	17	0,3
7-20	19,3	1,0	0,1	0,4	0,1	1,60	20,9	8	1,5

PROFIL N° 5

TERRE BRUNE LÉGÈREMEMENT PODZOLISÉE SUR PHYLLITES

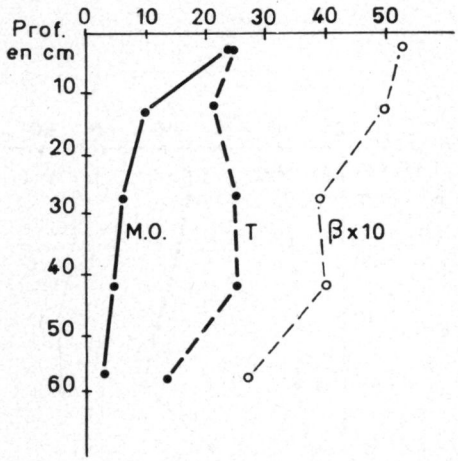
Situation : Chapelle des Trois-Fontaines, nord de Briec — Phyllites dévoniennes alternant avec des quartzites. Altitude 120 m — Pente 25-30°, exposition sud-ouest, bien drainé.
Végétation : Lande à *Ulex, Erica ciliaris*, graminées.
Description : 0- 5 : Couche organique de couleur brun foncé, aspect de feutre avec mélange de racines et de débris végétaux. Humus brut avec de petites fractions minérales.
5-20 : Couche minérale brun grisâtre imprégnée par l'humus de la couche supérieure. Graviers de quartz, lavés, atteignant 1 cm de diamètre.
20-35 : Horizon ocre foncé, transition insensible de la couche antérieure. Graviers de schistes.
35-50 : Brun ferrique nettement minéral, limoneux avec graviers anguleux de quartz et schistes.
50-65 : Continuation de l'horizon antérieur.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-5						3,75	3,15	5,12	4,88	23,5	21,6
5-20	17	20	12	18,7	12,2	4,00	3,55	5,42	4,58	0,1	13,1
20-35	17	22,5	10,5	18,8	16,0	4,30	3,80	5,90	3,43	5,2	13,0
35-50	7,5	27	15	22,2	15,5	4,80	4,20	6,05	3,39	4,0	14,1
50-65	10	25,5	14,5	24,7	16,1	5,00	4,30	6,40	2,23	2,0	17,8

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-5	21,2	1,0	0,9	0,34	0,36	2,60	23,8	11	2,3
5-20	19,9	0,25	0,25	0,20	0,36	1,06	21,0	5	1,0
20-35	24,2	0,25	0,1	0,10	0,20	0,65	24,9	3	2,1
35-50	24,7	0,25	0,0	0,06	0,12	0,43	25,1	2	5,1
50-65	12,5	0,25	0,0	0,06	0,12	0,43	12,9	3	2,0



GRAPHIQUE 3. — *Sol N° 5. — Terre brune légèrement podzolisée sur phyllites* (Trois-Fontaines).

PROFIL N° 6

TERRE BRUNE PODZOLISÉE SUR GRANULITE

Situation : Stangala près Quimper. — Altitude 130 m. — Pente 15°, exposition Sud, bon drainage.

Végétation : Terre anciennement cultivée, abandonnée depuis une cinquantaine d'années. Lande à *Ulex, Calluna, Erica,* graminées, *Rubus, Potentilla, Sarothamnus, Pinus.*

Description A 0-15 : Brun grisâtre, un peu structuré. Présence d'une grande quantité de fines racines, pas de transition nette entre les horizons. Un peu plus clair à la base.

B 15-45 : Brun ocre, structure faible. Éboulis de granulite assez gros et non arrondis.

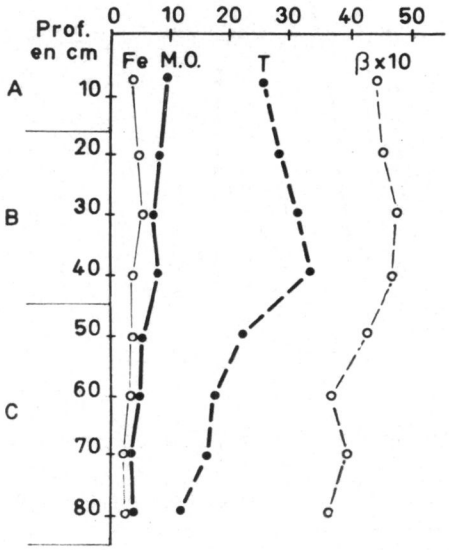
C 45-85 : Ocre plus clair que ci-dessus, un peu structuré. Présence d'éboulis de granites de grosseur irrégulière.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
0-15.....	14,0	14,5	18,0	12,6	26,2	4,50	4,10	5,70	4,48	9,7	19,5	3,9
15-25.....	14,0	16,5	16,5	24,2	16,5	4,50	3,90	5,60	4,52	7,3		5,1
25-35.....	8,0	24,3	22,5	15,8	17,7	4,65	4,15	5,65	4,74	6,7		5,2
35-35.....	2,5	24,5	26,0	20,0	14,2	4,65	4,32	5,75	4,67	7,9		3,8
45-55.....	3,0	24,5	26,5	15,0	21,2	4,75	4,45	5,92	4,24	4,8		4,0
55-65.....	2,0	23,0	23,0	23,2	19,2	4,70	4,50	6,10	3,60	4,6		4,0
65-75.....	1,9	23,6	28,0	17,2	21,2	4,60	4,50	6,02	3,92	3,1		3,4
75-85.....	1,0	22,5	24,5	22,4	21,5	4,65	4,50	6,10	3,60	3,1		3,1

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	A¹
0-15	23,9	1,75	0,9	0,2	0,12	2,97	26,8	6	5,25
15-25	27,5	0,20	0,3	0,08	0,10	0,68	28,2	2	7,25
25-35	30,6	0,20	0,1	0,12	0,06	0,48	31,0	2	8,50
35-45	33,5	0,20	tr	tr	0,10	0,30	33,8	1	7,75
45-55	22,6	0,20	tr	tr	tr		22,8		5,75
55-65	17,6	tr	tr	tr	tr		17,6		4,40
65-75	15,9	tr	tr	tr	tr		15,9		6,50
75-85	11,7	tr	tr	tr	tr		11,7		3,12



GRAPHIQUE 4. — *Sol N° 6. — Terre brune podzolisée sur granulite* (Stangala).

PROFIL N° 7

TERRE BRUNE LÉGÈREMENT PODZOLISÉE SUR LIMON GRANITIQUE

Situation : Bois de Kerustum près Quimper — Altitude 20 m.
Pente 5 à 10°, exposition sud-ouest. Bon drainage.

Végétation : Forêt de *Fagus, Quercus, Betula,* quelques *Pinus.* Sous-bois : *Ilex, Ulex, Hedera, Lonicera, Pteris, Rubus, Potentilla, Sarothamnus, Erica cinerea, Rhamnus.*

Description : 0- 2 : Litière forestière.
2- 6 : Couche de fermentation, léger aspect de feutre, humus brut, débris végétaux non décomposés.
6-10 : Cendreux, léger, colonisation par des mycélium de champignons, un peu minéral avec présence de sables lavés.
10-80 : Horizon B net. Couleur brun foncé dans sa partie supérieure mais plus clair avec la profondeur. Sans structure. Colluvions de granite.
Couche de fermentation 2-6 cm : pH (H_2O) = 4,1, C/N = 19,7.

Le sol n° 7 n'a pas été analysé, mais de son aspect extérieur se déduit une forte analogie avec la description précédente.

Avec le sol n° 8, nous observons une accumulation de fer constituant l'horizon B où se remarque aussi une très légère augmentation du taux d'argile.

PROFIL N° 8

TERRE BRUNE PODZOLISÉE SUR QUARTZITES

Situation : TREGOUREZ : Montagnes Noires — région de collines — Altitude 200 m — bon drainage Pente 10°, exposition est.

Végétation : Lande à éricacées très dégradée.

Description : A, 0-20 : Noir grisâtre, léger, un peu cendreux, avec des racines qui s'infiltrent dans la couche inférieure. Abondance de cailloux.

B, 20-35 : Accumulation de fer, couleur brune, infiltration d'humus de l'horizon supérieur.

C, 35-140 : Horizon colluvial, brun, avec cailloux de solifluxion de quartzites. Un peu structuré, très pierreux et irrégulier.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-20	9,5	18,5	20	15,0	5,4	3,95	3,25	5,30	6,18	20,4	27,3
20-35	10,5	25,0	19,5	15,5	10	4,25	3,75	5,50	4,62	8,7	30,3
35-140	7,5	27,0	16,5	15,4	12,4	4,75	4,15	5,88	3,93	7,0	44,5

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-20	33,8	1,0	1,20	0,28	0,26	2,74	36,5	8	3,25
30-35	20,3	0,25	0,10	0,06	0,04	0,45	20,8	2	2,0
35-140	18,6	0,25	0,0	0,04	0,04	0,33	18,9	2	2,5

Le profil n° 5 (Trois-Fontaines) répond, de même, à ce type de « terre brune podzolisée ». Il existe un léger accroissement de la capacité d'échange dans les horizons 20-35 et 35-50 cm, ce qui indique une certaine migration de colloïdes à cette profondeur. Le pouvoir tampon (β), quant à lui, s'y maintient constant pour descendre rapidement au-delà de 50 cm.

La représentation graphique des variations de la matière organique, de β, de T et du fer libre permet la comparaison des terres brunes normales et des terres brunes podzolisées (graph. 1, 2, 3 et 4). Les sols n° 1 et 2 maintiennent une constance de leurs propriétés avec la profondeur tandis que les profils 4, 5, 6, 7 et 8 montrent une différenciation accusée de leurs divers horizons.

La podzolisation augmente dans ces terres brunes en fonction de la végétation. Cette podzolisation, de plus en plus marquée, est en même temps corrélative du passage de la végétation forestière (n° 4 et 7) à une végétation de landes d'éricacées très dégradées (n° 5 et 8). Un autre facteur important réside dans la roche-mère. En effet, le passage des schistes argileux au granite et à la quartzite est favorable à une podzolisation de plus en plus forte.

En résumé, nous pouvons dire que les « terres brunes » existent en Bretagne où elles constituent une ample gamme de types déterminés par la roche-mère et la végétation. Nous croyons qu'elles représentent les sols climax de la région et intéressent la majeure partie des territoires non influencés par un niveau d'eau superficiel. Il est possible qu'elles soient portées à un degré de podzolisation avancé. Elles peuvent donner des podzols lorsque les conditions sont favorables à cette évolution, quand la roche-mère est très acide et très filtrante (grès armoricains) et quand la végétation correspond à la lande d'éricacées, comme nous allons le voir au paragraphe suivant.

C. — Podzols

Les podzols se rencontrent en Bretagne presque uniquement sur les grès et quartzites et sous végétation de bruyères. La présence d'un podzol bien développé sur granulite au Stangala (n° 9) est probablement un cas rare en Bretagne. Il s'agit

PROFIL N° 9

PODZOL SUR GRANULITE

Situation : Stangala près Quimper — Altitude 130 m — Pente 10°, Exposition Nord — bon drainage.

Végétation : Bois mixte, *Pinus, Quercus,* quelques *Betula.* Sous-bois : *Ilex, Vaccinium, Ulex, Calluna, Pteris, Rhamnus, Erica,* mousses très abondantes.

Description : A0, 0-5 : Humus brut, spongieux, couleur café foncé. Abondants restes de racines entrelacés formant un feutrage qui se sépare facilement de la couche inférieure.

A1, 5-20 : Cendreux avec des racines abondantes, léger. Transition assez nette avec l'horizon inférieur.

Ae, 20-40 : Gris, léger, cailloux de granulite assez gros. Nettement différencié comme horizon A^e.

Bh, 40-50 : Organique, brun-foncé, presque noir. En mélange avec des blocs de granulite importants. Un peu plastique, sans structure.

Bs, 50-80 : Accumulation de fer de couleur brun-ocre, d'aspect limoneux et intercalée entre les éboulis.

C > 80 : Ocre plus clair sans différenciation spéciale par rapport à l'horizon ci-dessus.

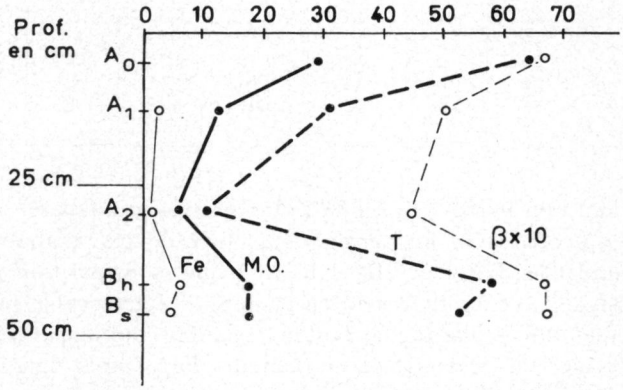
Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
A_0						4,35	4,1	5,1	6,55	28,7	27,2	
A_1	7,5	14,7	13,3	16,3	28,1	3,80	3,6	5,3	5,0	12,3	18,1	2,5
A_e	5,5	17,5	17,0	18,8	27,7	4,10	4,0	5,7	4,4	5,6	16	1,0
B_h	13,0	17,5	11,5	10,0	16,6	4,10	4,0	5,1	6,55	17,0	25	5,3
B_s	0,5	19,4	18,4	17,4	17,8	4,40	4,3	5,3	6,55	17,3	23,4	4,7

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
A_0	62,3	tr	0,75	0,46	0,5	1,71	64,0	3	3,87
A_1	29,4	tr	0,55	0,2	0,32	1,07	30,5	4	3,0
A_e	9,9	tr	0,0	0,14	0,20	0,34	10,2	3	1,25
B_h	56,3	tr	0,75	0,14	0,32	1,21	57,5	2	3,75
B_s	51,0	0,25	0,0	0,16	0,20	0,61	51,6	1	3,30

d'une formation locale. Le type de podzol, rencontré jusqu'à ce jour, est le podzol humo-ferrugineux parfaitement développé, tel qu'il existe au Mont-Saint-Michel de Brasparts (nº 10) et décrit par A. DEMOLON comme l'un des plus typiques de France (DEMOLON, 1952).



GRAPHIQUE 5. — *Sol Nº 9. — Podzol sur granulite* (Stangala).

Des résultats analytiques du profil nº 10, on portera un intérêt particulier à la variation de matière organique en fonction de la profondeur, qui démontre une accumulation d'humus dans l'horizon B_h ou B_1, aux teneurs en fer libre, qui démon-

PROFIL Nº 10

PODZOL HUMO-FERRUGINEUX SUR GRÈS ET QUARTZITES

Situation : Saint-Michel-de-Brasparts — Monts d'Arrée — Altitude 330 m. Pente 20º, exposition est. Bon drainage.

Végétation : Lande très dégradée à *Ulex, Erica ciliaris, Calluna vulgaris, Molinia.*

Description A_1, A_0, 0-35 : Horizon humifère noir, très riche en débris organiques grossiers et traversé par les racines surtout dans les 5 à 6 cm supérieurs.

A_2, 35-65 : Horizon totalement lessivé, de couleur grise. La fraction fine a une structure cendreuse prononcée. Très pauvre en éléments colloïdaux.

B_1, 65-75 : Accumulation humique noire. Horizon plus consistant que le précédent sans qu'il y ait toutefois cimentation entre la matière organique et la matière minérale.

B_2, 75-82 : Accumulation ferrugineuse de couleur rouille sans cimentation. Le contenu en argile de ces deux derniers horizons est plus important que dans le reste du profil.

B_3 82-100 : Couleur ocre beige, limon en mélange avec la roche-mère. Tout le profil contient en grande quantité des graviers et cailloux de grès et quartzite.

Résultats analytiques :

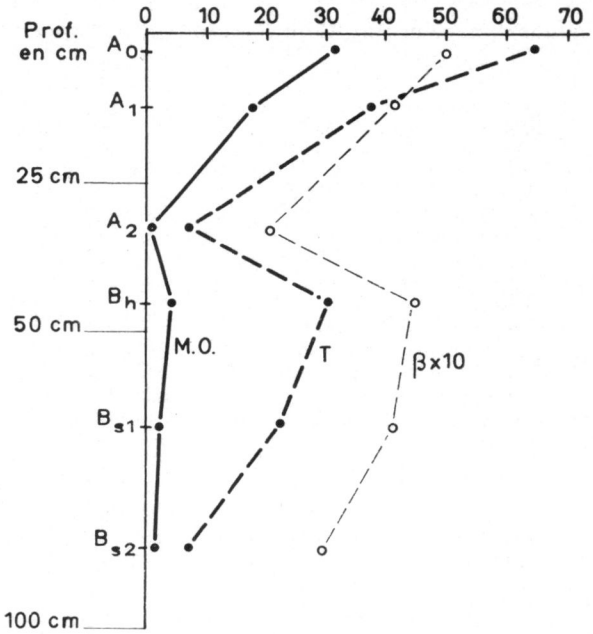
	A	L	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
A_0					4,0	3,5	5,1	5,43	32	26	
A_1	1,8	11,8	70,2	13,0	4,1				3,4	16	0,1
A_2	2,4	14,2	60,5	22,2	4,15				0,6	6,2	0,4
B_1	13,5	13,4	47,2	14,7	4,0	3,48	5,3	4,83	6,2	15	2,0
B_2	7,2	14,6	55,5	15,5	4,35	3,95	5,75	4,1	2,8	11,7	5,3
B_3	4,6	8,2			4,75	4,6	6,3	2,92	0,8		1,3

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
A_1	38,1	2,5	1,5	0,7	0,9	5,6	43,7	13	1,56
A_2									
B_1	31,8	1,5	tr	0,12	0,12	1,74	33,5	5	5,25
B_2	21,3	1,0	tr	0,14	0,10	1,24	22,5	5	5,25
B_3	6,1	tr	tr	0,04	0,06	0,1	6,2	2	7,35

trent la formation d'un horizon B_s ou B_2 à une grande profondeur, à la variation de T, qui est en accord avec les deux valeurs précédentes. L'analyse mécanique confirme l'accumulation d'argile en B_h et B_s ainsi que sa disparition presque totale des horizons lessivés A_1 et A_2. La teneur en aluminium échangeable suit une courbe parallèle à celle du fer libre, elle augmente d'une manière continue avec la profondeur.

Nous ne devons pas écarter, comme facteurs importants dans l'évolution de ce sol, en plus de ceux déjà considérés, l'altitude et le climat. La station n° 10 est située à plus de 300 m d'altitude, ce qui est élevé pour la Bretagne, et le climat y est notablement plus froid que dans la région méridionale bordant la côte de l'Atlantique.



GRAPHIQUE 6. — *Sol N° 11. — Podzol humo-ferruginewx sur grés et quartzites* (Nord de Briec).

Le podzol n° 11 (Nord de Briec) se rencontre de même sur grès armoricains et sous lande d'*Erica ciliaris, Ulex, Molinia,* il représente une légère variation par rapport au précédent. Il est parfaitement développé, comme cela se vérifie non

seulement par les observations visuelles mais aussi par les données de laboratoire. L'horizon A_e est fortement lessivé, très pauvre en argile, sans matière organique et avec des valeurs T et β très basses. Une forte accumulation d'humus et de fer se manifeste dans les horizons B_h et B_s. Comme cela est normal, la capacité totale d' échange est plus forte en B_h (enrichissement plus important en argile et en matières organiques) qu'en B_s. La topographie est horizontale dans les environs aussi, existe-t-il quelques zones mal drainées où l'on rencontre la variante « podzol de gley ».

PROFIL N° 11

PODZOL HUMO-FERRUGINEUX SUR GRÈS ET QUARTZITES

Situation : Nord de Briec — Sommet gréseux, altitude 170 m. Topographie horizontale, bien drainé en été.

Végétation : Lande à *Ulex, Erica ciliaris, Molinia,* quelques *Pinus.*

Description :

A_0, 0-5 : Humus brut couleur de café, lâche et constitué par des débris végétaux entrecroisés.

A_1, 5-15 : Cendreux, organique, en mélange avec des graviers grossiers et irréguliers, léger sans structure. Présence de grumeaux grossiers d'humus brut autour des cailloux anguleux.

A_e, 15-40 : Horizon minéral gris clair, net, constitué par du sable fin, et des cailloux anguleux de grès.

B_h, 40-50 : Brun foncé, pulvérulent et sans structure. Typique d'une accumulation d'humus. En mélange avec des cailloux.

B_{s1}, 50-80 : Couleur brun ferrique très forte à la partie supérieure et devenant progressivement plus claire avec la profondeur.

B_{s2}, 80-110 : Suite de l'horizon antérieur mais plus clair. Cailloux de grès anguleux.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
A_0						3,8	3,05	5,0	5,06	31,3	26,6
A_1	6,0	14,0	15,5	19,9	21,2	3,85	3,0	5,4	4,0	17,5	30,2
A_e.....	3,5	28,0	18,0	20,1	17,7	4,0	3,3	6,25	2,03	0,4	29,6
B_h.....	23,0	10,0	14,0	16,9	15,2	3,95	3,4	5,4	4,44	4,2	12,0
B_{s1}.....	11,5	22,5	13,0	21,0	18,3	4,45	3,9	5,72	4,13	1,3	
B_2.....	6,0	20,0	16,5	24,4	19,2	4,75	4,55	6,3	2,86	0,3	

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
A_0	58,0	4,26	1,9	0,7	0,34	7,2	65,2	11	1,0
A_1	34,5	2,26	0,75	0,36	0,02	3,39	37,9	9	1,95
A_2	5,5	0,25	0,05	0,36	0,02	0,68	6,2	11	0,6
B_h.....	30,0	0,0	0,1	0,28	0,0	0,38	30,3	1	2,4
B_{s1}.....	21,6	0,25	0,0	0,20	0,0	0,45	22,0	2	2,5
B_{s2}.....	6,4	0,25	0,0	0,20	0,0	0,45	6,9	7	1,95

Dans le profil n° 9 sur granulite, situé à 5 km au nord de Quimper (Stangala), on peut distinguer tous les horizons d'un podzol mais jamais aussi nettement qu'au cours des deux descriptions précédentes. Il n'y a toutefois pas de doute quant à

sa classification exacte. Il s'agit d'un podzol humo-ferrugineux normal et les résultats de laboratoire confirment ce point de vue. L'analyse granulométrique indique une accumulation d'argile en B_h et les analyses chimiques sont également en accord : matière organique, fer libre, T, Al d'échange, etc. L'acidité de A_0 est cependant moins forte que dans le cas des deux podzols précédents et la comparaison des graphiques 5 et 6 permet d'apprécier une différenciation moins parfaite des divers horizons.

Jusqu'ici l'observation de ce type de podzol sur granulite se limite à ce cas et à un autre cas rencontré à proximité de Quimper également.

D. — Plastosols

Ce sont des sols caractérisés par une grande plasticité à l'état humide et qui dérivent de roches silicatées peu acides et presque toujours bien pourvues en Ca et Mg : amphibolites, serpentines, séricites. Ils se distinguent par une acidité inférieure à celle de tous les autres types de sols bretons puisque leur pH (H_2O) oscille aux environs de 6. Leur degré de saturation est très élevé, V est fréquemment supérieur à 40.

La variabilité des types de roches suivant leur degré de saturation en bases permet une grande variété de sols qui vont des Braunlehm « terrifiés » sur amphibolite (n° 12, forêt de Peumerit) aux Rotlehm structurés sur amphibolites et serpentines, très plastiques surtout sur cette dernière roche. A la station n° 13 sur amphi-

PROFIL N° 12

BRAUNLEHM « TERRIFIÉ » SUR AMPHIBOLITE

Situation : 500 m N. E. de Peumerit — Altitude 80 m.
Topographie plane, bien drainé.

Végétation : Bois très dense de *Castanea, Corylus avellana, Fraxinus, Carpinus betulus, Abies pectinata.* Sous-bois : *Ruscus, Hedera, Primula, Euphorbia, Viola.*

Description : 0-2 : Litière abondante.
2-5 : Horizon limoneux, minéral, à humus « Mull » typique. Cailloux anguleux d'amphibolites de taille variable, légèrement altérés et de couleur rouille foncé.
5-20 : Horizon minéral, de couleur rouille foncé sans transition nette par rapport à l'horizon supérieur. Pulvérulent, éléments isolés et sans structure.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
2-5						4,3	3,8	5,45	4,84	16,9	18,6
5-20	8	17,5	15,5	20,6	16,7	4,45	3,85	5,55	4,60	8,6	18,4

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
2-5	18,6	1,25	1,75	0,20	0,26	3,46	22,0	16	1,50
5-20	28,1	0,50	0,40	0,14	0,16	1,20	29,3	4	3,35

bolite serpentinisée, on remarque un horizon de pseudo-gley (20-30 cm) favorisé, de plus, par l'horizontalité du terrain. Dans le complexe d'échange la quantité de Mg est très supérieure à la quantité de Ca, ce qui n'est jamais le cas sur les autres roches-mères. Par exemple, l'horizon C du sol n° 13 contient 0,25 méq de Ca contre 3,25 méq de Mg, l'horizon 10-30 cm du sol n° 15 : 1,76 méq de Ca contre 4,0 méq de Mg. Les horizons B et C des terres brunes contiennent aux environs de 0,25 méq de Ca avec seulement des traces de Mg. Les cations K et Na sont, de même, mieux représentés dans le complexe des plastosols.

PROFIL N° 13

BRAUNLEHM PSEUDO-GLEYIFIÉ SUR AMPHIBOLITE SERPENTINISÉE

Situation : POULDREUZIC — Carrefour D-2 et D-202. Altitude 40 m.
Pente faible. Drainage gêné par suite de la texture.

Végétation : Lande très pauvre à *Erica cinerea*, *Ulex nanus* et graminées.

Description : A 0-10 : Horizon brun noirâtre à humus de type « Mull », grumeleux avec présence de petits graviers d'altération de la roche-mère. Abondantes racines qui atteignent l'horizon suivant.

(B) 10-20 : Horizon minéral brun rougeâtre, limoneux, plastique, colonisé par les insectes. En mélange avec des graviers. Passe insensiblement à la couche inférieure.

C 20-30 : Ocre foncé, plastique, avec séparation de concrétions ferrugineuses. Légèrement pseudo-gleyifié.

plus de 30 : Roche altérée in situ (amphibolite serpentinisée).

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N	Fe
A	12,0	25,5	16,5	9,8	11,0	6,15	5,8	6,35	5,42	15,4	13,9	8,2
(B)	13,9	31	15,9	7,4	15,0	6,35	5,85	6,52	4,17	8,3	9,8	10,2
C	9,5	25	18,5	13,3	17,7	6,55	6,12	6,72	3,18	3,5		10,5

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
A	12,6	0,50	3,00	0,60	0,40	4,50	17,1	26	0,5
(B)	8,4	0,50	3,25	0,30	0,80	4,85	13,2	37	0,0
C	4,2	0,25	3,25	0,16	0,74	4,40	8,6	51	0,0

Lorsque ces sols se rencontrent sur des limons alluviaux, ils donnent de bons sols de culture grâce à leur capacité élevée de rétention pour l'eau et à leur richesse en éléments nutritifs. Sur amphibolite, mais plus spécialement sur serpentine, la terre se transforme facilement en boue et son travail devient difficile. Dans le cas des sols in situ, la roche compacte ne permet pas d'avoir une grande profondeur meuble. La végétation rencontrée est une lande d'éricacées très pauvre, contrairement à ce que l'on pourrait attendre avec un tel degré de saturation en bases et un tel pH. Ces types de roches sont peu représentés en Bretagne, aussi ce groupe de sols occupe des superficies restreintes.

PROFIL N° 14

ROTLEHM SUR AMPHIBOLITE

Situation : PEUMERIT : Kerguelmes. Altitude 70 m.
Pente faible. Orientation ouest. Bon drainage.
Végétation : Bosquet de pins avec sous-bois de graminées.
Description : 0- 3 : Couche de fermentation très nette, constituée par des restes d'aiguilles de pins et de graminées, couleur rouge noirâtre.
3-20 : Horizon minéral, rouge foncé, sans structure, limoneux.
plus de 20 : Roche-mère. Amphibolite schisteuse un peu altérée en surface.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-3						5,45	5,0	5,75	6,25	19,3	15,7
3-20	19,5	26,0	12,5	15,6	13,9	5,60	5,1	6,00	5,26	6,9	14,9

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-3	29,4	5,77	2,80	0,56	1,06	10,2	39,6	26	0,5
3-20	16,4	2,76	4,75	0,36	0,84	8,7	25,1	35	0,5

PROFIL N° 15

ROTLEHM « TERRIFIÉ » SUR SERPENTINE

Situation : PEUMERIT — Kerguelmes, près de la carrière. Altitude 70 m.
Pente 10-15°, exposition Nord. Bon drainage.
Végétation : Lande à *Ulex, Erica,* Graminées. Quelques pins mal développés.
Description : 0-10 : Horizon rouge foncé, humus de type « Mull », léger. Aspect de feutre par action des racines de graminées. Sans structure. Présence de quelques cailloux irréguliers de serpentine et d'amphibolite.
10-30 : Horizon minéral, rouge moins foncé sans transition nette avec le précédent. Structuré avec un aspect plastique et lourd. Présence d'abondants cailloux.
plus de 30 : Serpentine altérée en surface mais compacte en profondeur.

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-10	17,5	14,0	20,5	7,8	14,5	6,25	5,65	6,32	5,04	21,1	14,2
10-30	20,0	28,5	14,0	7,7	16,2	6,40	6,12	6,40	6,81	17,1	

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
0-10	15,1	4,26	4,75	0,52	1,46	11,0	26,1	42	0,4
10-30	9,1	1,76	4,00	0,36	1,00	7,1	16,2	44	0,0

E. — Sols alluviaux non gleyifiés — Vega brune

C'est le cas du n° 16 (terrasse de l'Odet) sur sédiments fluviaux pliocènes. Il s'agit d'une Vega brune allochtone où il n'est pas possible de différencier les horizons dans les couches supérieures, mais où il existe divers types de sédimentation : présence de graviers arrondis dans les 40 premiers centimètres, absence au-dessous. Dans sa phase cultivée, il y a une forte augmentation du degré de saturation sous l'effet des apports d'engrais et d'amendements.

PROFIL N° 16

VEGA BRUNE ALLOCHTONE

Situation : Route de Bénodet, près Quimper. Terrasse de l'Odet. Altitude 15 m. Pente nulle.
Végétation : Culture d'avoine.
Description : 0-20 : Horizon brun grisâtre, minéral, structuré grâce aux racines de la graminée, graviers de quartz arrondis de 2 cm de diamètre environ. Horizon assez compact.
20-40 : Horizon brun clair de transition entre la couche cultivée et la couche inférieure. Graviers arrondis de grosseur variable atteignant 4 à 5 cm de diamètre.
40-80 : Limon sableux, crème foncé, sans graviers grossiers, légèrement structuré et plus perméable que les horizons supérieurs.
Il n'existe pas de zones de couleurs différentes, le dépôt est uniforme (sédiments Pliocène).

Résultats analytiques :

	A	L	Lg	Sf	Sg	pH H_2O	pH KCl	pH p. nitro	β	M.O.	C/N
0-20	10,5	12,0	9,5	10,9	42,8	5,70	5,00	6,32	3,40	9,1	21,0
20-40	12,5	15,5	2,0	9,0	44,4	5,15	4,60	6,10	3,75	5,8	19,5
40-80	13,0	10,5	7,0	7,7	53,8	5,00	4,25	6,10	3,27	5,5	

Complexe d'échange :

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	A_I
0-20	6,49	5,02	0,3	0,28	0,18	5,78	12,3	47	2,0
20-40	5,63	1,00	0,0	0,10	0,24	1,34	6,9	19	3,0
40-80.....	3,46	0,50	0,0	0,06	0,20	0,76	4,2	18	2,6

F. — Formes d'humus

La caractérisation des formes d'humus a été faite morphologiquement sur place puis, il a été réalisé des déterminations de laboratoire telles que : pH, rapport C/N, T, etc. Il n'a pas été possible, jusqu'à présent, de trouver un test chimique suffisant. La micromorphologie selon Kubiena serait la méthode la plus adéquate pour établir des différences typiques mais elle n'a pu être utilisée dans le cadre de ce travail.

D'une manière générale, la Bretagne occidentale est caractérisée par l'existence de la forme d'humus dénommée « Moder » et qui correspond aux sols climax de cette région.

Toutefois, il y a une forte variation dans les formes existantes, en relation, spécialement, avec la roche de départ et comme conséquence avec le type de sol.

A l'intérieur d'une même zone climatique, l'influence de la roche-mère est le facteur définitif dans la différenciation des types d'humus et de sols.

Sur les grès et quartzites se rencontrent des formes d'humus brut (Mor) avec formation de podzols et de sols plus ou moins podzolisés sous végétation de landes d'éricacées ou de conifères, de feuillus à sous-bois de vaccinium et autres plantes acidophiles.

Sur les granites, on trouve des Moder et des Moder-mulliformes avec des sols qui vont de la terre brune à la terre brune podzolisée, parfois même jusqu'au podzol. La végétation est celle de la forêt mixte avec prédominance de feuillus, la lande existe uniquement sur les sommets où la roche est compacte et la profondeur meuble très faible (sols de type « Ranker »).

Sur les schistes sériciteux et argileux, altérés jusqu'à une assez grande profondeur, on rencontre fréquemment des nappes alluviales et colluviales de limons plus ou moins grossiers qui donnent des « terres brunes » et des limons « terrifiés ». La forme d'humus est, ici, le Moder-mulliforme avec une tendance vers le Mull acide. On a alors des sols qui conviennent bien à la culture et sont très fertiles d'une manière générale.

Sur les roches plus basiques, telles que l'amphibolite et la serpentine, se forment des limons bruns et rouges (Braunlehm et Rotlehm), avec comme humus le Mull et une couverture végétale de bois de feuillus. S'il existe des conifères ou des landes, l'humus évolue différemment et il est alors possible d'apprécier un stade de paupérisation.

A titre d'exemple, voici les résultats de l'analyse de deux humus, l'un de type Moder, l'autre de type Mor. Le premier a été prélevé, dans un bosquet de châtaigniers, sur roches granitiques près de Pont-Aven (H_1 sur la carte C), le second, dans la forêt de Carnoët sous pins et, également sur roches granitiques à quelques centaines de mètres du profil n° 4 (H_2 sur la carte C).

	pH H_2O	KCl pH	p. nitro pH	β	M.O.	C/N
H_1-Moder	3,95	3,48	5,35	4,69	21,3	25,9
H_2-Mor	3,65	2,92	4,30	6,61	75,4	58,9

	H	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	Al
H_1-Moder ...	35,6	0,63	8,0	1,0	1,0	10,6	46,2	23	0,6
H_2-Mor	97,7	0,63	1,87	0,63	0,25	3,38	101,1	3	0,12

Les pH de ces deux humus sont très bas mais le pH du Mor est le plus faible. Les rapports C/N des « Moder » sont généralement compris entre 20 et 25, tandis que ceux des« Mor» sont plus élevés et ceci, particulièrement, dans le cas présent. Autre remarque importante : les pourcentages de saturation sont très différents et à l'avantage du type « Moder ».

V. — RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Les principaux types de sols non hydromorphes rencontrés en Bretagne occidentale sont décrits et analysés.

Il semble que la « terre brune plus ou moins podzolisée » et caractérisée par un humus de type « Moder » représente le sol « climax ».

Suivant la roche-mère et la végétation, on peut passer de la « terre brune » non podzolisée (sol brun-acide) au « podzol humo-ferrugineux » complètement développé. La roche-mère a une importance primordiale dans cette évolution de par ses caractères de perméabilité et de composition chimique.

Un panorama complet des sols bretons nécessite encore de nouvelles prospections, des analyses plus poussées des humus et, enfin, l'examen des sols rankeriformes puis des sols hydromorphes si fréquents dans le fond des vallées et dans certaines dépressions à sédiments tertiaires.

Reçu pour publication en décembre 1962.

SUMMARY

A STUDY OF THE MAIN SOIL TYPES IN BRITTANY

Sixteen profiles of soils in Western Brittany are described in some detail, and their textural and chemical properties are determined in the laboratory.

The soils are classified according to KUBIENA'S system.

The principal parent rocks are : sandstones, quartzites, granulites, various primary schists, amphibolites and serpentines.

It appears that the « more or less podzolized brown soil », characterized by « Moder-type » humus, represents a climax soil.

All intermediaries between brown soil (Braunerde, Brown earth) and ferruginous humus podzol are encountered fully developped according to the parent rock and vegetation.

ZUSAMMENFASSUNG

STUDIUM DER WICHTIGSTEN BODENTYPEN DER BRETAGNE

Sechszehn Bodenprofile der westlichen Bretagne werden ausführlich beschrieben und im Labor in Bezug auf Korngrössenfeinheit und chemische Zusammensetzung untersucht.

Die Klassifikation dieser Böden geschah nach der Benennung von Kubiena.

Die hauptsächlichsten Muttergesteine sind : Sandboden, Quarziten, verschiedene primäre Schiefergranuliten, Amphiboliten und Serpentinen.

Die « mehr oder weniger podsolisierte Braunerde », durch einen Humus vom Typus « Moder » gekennzeichnet, stellt den « Klimax »-boden dar.

Je nach Muttergestein und Vegetation kann man alle Zwischen-Stufen zwischen Braunerde und vollkommen entwickeltem eisen-humosem Podsol antreffen.

РЕЗЮМЕ

Изучение главнйших типов почв бретани.

Ф. ГИТИАН-ОХЭА и М. КОППЕНЭ (Сантиаго де Компостэла и Кемпэр).

Шестнадцать профилей почв западной Бретани подробно описаны в этом очерке, дающем также результаты гранулометрических и химических анализов проведенных в лаборатории.

Классификация этих почв произведена при помощи номенклатуры Кубиены. Главными материнскими породами являются : песчанники, кварциты, гранулиты, различные первичные сланцы, амфиболиты и серпентины.

Выяснено что бурая, более или менее подзолистая почва, характеризующаяся гуммусом типа « Модэр », является « почвой-климаксом ».

Между бурой почвой (Braunerde, Brownearth) и гумино-железистым подзолом законченной эволюции и, в зависимости от материнской породы и растительности, можно встретить также все промежуточные стадии.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique. *Ann. Agron.*, 161-172.

COPPENET M., HELIAS M., 1958 *a*). Les sols de la région de Gourin (Morbihan). *Ann. Agron.*, **9**, 217-255.

COPPENET M., HELIAS M., 1958 *b*). Valeurs du pH et du rapport carbone-azote de quelques humus forestiers et de landes en Bretagne. *Bull. A. F. E. S.*, nº **8**, 412-420.

COPPENET M., 1962. Les sols de la région Lorient-Hennebont, Belle-Ile-en-Mer et Groix. *Ann. Agron.* **13**, 65-88.

DEMOLON A., 1952. *Dynamique du sol.* Dunod éd. Paris, 5e éd., p. 83.

DUCHAUFOUR Ph., 1961. Le rôle de la végétation dans l'évolution des sols. *Bull. A. F. E. S.*, nº **4**, 168-193.

DUVAL L., 1959. Application de la méthode densimétrique aux sols de Bretagne. *Trav. Sta. Agron. I. N. R. A.*, 1R-4R. *et Ann. Agron.*, 1963, **14**, 219-226.

GUITIAN-OJEA F., 1958 Capacidad de cambio de cationes y grado de saturacion. (Thèse). *Boletin de la Universidad Compostelana*, nº 66.

GUITIAN-OJEA F., MUÑOZ-TABOADELA M., 1960. Poder de amortiguacion del suelo. *An. Edafol. Agrobiol.*, **19**, 303-314.

KUBIENA W. L., 1953. The soils of Europe ; illustrated diagnosis and systematics. *Consejo sup. Invest. cient. Madrid.*

MEHLICH A., 1948. Determination of cation and anion-exchange properties of soils. *Soil Sci.*, **66**, 429-445.

MERIAUX S., 1954. Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. *Ann. agron.*, **5**, 5-59, 149-205.

MITCHELL B. B., MACKENZIE R. C., 1954. Removal of free iron oxide from clays. *Soil. Sci.*, **77**, 173-184.

ROBELIN M., COPPENET M., HELIAS M., 1957. Étude et cartographie des sols d'une commune des Côtes du Nord : Loguivy-Plougras. *Ann. agron.*, **8**, 433-465.

ROBERTSON, 1950. The colorimetric determination of aluminium in silicate matérials. *J. Sci. Food Agric.*, **2**, 59-63.

Ann. agron., 1963, **14** (2), 219-226

631. 431 (44)

APPLICATION DE LA MÉTHODE DENSIMÉTRIQUE AUX SOLS DE BRETAGNE

L. DUVAL
avec la collaboration technique de L. Le Corre,
Station d'Agronomie, Quimper (Finistère)

SOMMAIRE

La présente note concerne l'adaptation de la méthode densimétrique aux sols de Bretagne. Le problème de la destruction de la matière organique et l'influence de la température de sédimentation sur les mesures densimétriques y sont étudiés. En outre, les résultats obtenus sont comparés à ceux que donnent d'autres procédés.

I. — INTRODUCTION

La méthode densimétrique, proposée par Mme Mériaux (Mériaux, 1954 et 1957) pour l'analyse granulométrique des sols, présente l'avantage de donner une répartition continue des particules en fonction de leur dimension. Grâce à cette propriété, il est commode de représenter les courbes caractéristiques des sols étudiés.

L'adaptation de cette méthode aux sols de Bretagne a donné lieu à quelques mises au point. Étant donné le caractère humifère des sols expérimentés, il nous a fallu définir les conditions optimales de destruction de la matière organique. Nous avons, par ailleurs, comparé les résultats obtenus par l'analyse densimétrique à ceux de la méthode pipette de Robinson. Enfin, nous avons recherché l'influence de la température de sédimentation sur les mesures densimétriques.

II. — DESTRUCTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Les sols de Bretagne sont particulièrement riches en matière organique. Les sols cultivés contiennent de 0,20 à 0,35 p. 100 d'azote et leur perte au feu varie entre 6 et 9. p. 100. Dans les terres de landes, la teneur en azote atteint 0,5 p. 100 et la perte au feu est supérieure à 10 p. 100.

Dans ces sols humifères, la destruction de la matière organique a soulevé quel-

ques difficultés pour l'emploi correct de la méthode densimétrique. Aussi, il convenait de définir la quantité optimale d'eau oxygénée nécessaire à la destruction de la totalité des agrégats et, en même temps, il était possible de préciser l'importance des erreurs causées par une destruction incomplète.

A. — Recherche de la quantité optimale d'eau oxygénée

Sur un poids de 30 grammes de terre, nous utilisons des doses croissantes d'eau oxygénée. Celles-ci vont de 50 ml à 10 volumes — H_2O_2 à 3 p. 100 — jusqu'à 200 ml à 110 volumes — H_2O_2 à 33 p. 100. —.

Après l'attaque réalisée au bain-marie bouillant, les échantillons sont filtrés et lavés à l'eau distillée jusqu'à élimination totale de l'eau oxygénée non détruite. Ils sont ensuite soumis à une agitation d'une heure en présence d'hexamétaphosphate de sodium.

Pour cet essai, nous avons retenu trois types de sol dont la perte au feu, après correction de la teneur en argile, est très voisine de 10 p. 100. Les deux premiers échantillons correspondent à deux types de sol dominants en Bretagne : KERVOUYEC, granulite de la région de Quimper, et PLEYBEN, schiste du bassin de Châteaulin. Le troisième, TYMEN, provient d'un sol formé sur kersantite ; en Bretagne, la présence de cette roche se résume à quelques zones de superficie réduite, la plus importante est située sur la commune de Quimper.

Au cours des manipulations, nous déterminons le pourcentage des particules de diamètre égal ou inférieur à 50 μ, 20 μ et 2 μ. Ceci permet de distinguer les trois classes suivantes :

— limon grossier, particules de diamètre compris entre 20 μ et 50 μ,
— limon, particules de diamètre compris entre 2 μ et 20 μ,
— argile, particules de diamètre inférieur à 2 μ.

B. — Résultats

L'examen du tableau 1 fait apparaître plusieurs points :

1°) Quel que soit le type de sol étudié, le taux d'argile est anormalement bas pour les faibles concentrations en eau oxygénée. Il croît avec le degré de l'attaque et il ne devient constant qu'après la destruction complète de la matière organique.

Le phénomène est identique pour les particules de diamètre égal ou inférieur à 20 μ. Il faut toutefois souligner que leur pourcentage est constant pour des concentrations en eau oxygénée inférieures à celle qu'exige la libération de toute la fraction argileuse. En effet, la somme de l'argile et du limon est déjà fixe alors que le pourcentage d'argile n'a pas atteint sa valeur maximale.

Le pourcentage des particules de diamètre égal ou inférieur à 50 μ varie peu et il est pratiquement indépendant du degré de l'attaque.

A la suite de ces constatations, nous pouvons penser que la matière organique enrobant les limons grossiers est facilement détruite. Par contre, celle qui est associée aux particules minérales de plus faible diamètre — limon et argile — résiste à une attaque peu énergique. En conséquence, la matière organique confère à ces particules un diamètre supérieur à leur diamètre réel.

TABLEAU I

Pourcentages de plusieurs fractions granulométriques pour différentes concentrations en H_2O_2

Localité et nature de l'échantillon	Diamètre des particules	sans H_2O_2	50 ml H_2O_2 à 10 vol.	50 ml H_2O_2 à 20 vol.	50 ml H_2O_2 à 50 vol.	50 ml H_2O_2 à 110 vol.	100 ml H_2O_2 à 110 vol.	200 ml H_2O_2 à 110 vol.
TYMEN (Kersantite)	⩽ 50 μ	59	63	64	64	65	63	62
	⩽ 20 μ	36	36	36	37	46	46	45
	⩽ 2 μ	2	2	2	3	9	20	20
KERVOUYEC (granulite)	⩽ 50 μ	32	33	35	32	31	32	31
	⩽ 20 μ	16	21	24	23	23	23	23
	⩽ 2 μ	2	5	8	10	10	10	10
PLEYBEN (schiste)	⩽ 50 μ	64	67	66	67	68	66	67
	⩽ 20 μ	35	36	35	44	50	49	49
	⩽ 2 μ	1,5	2	2	4	14	13,5	14

2°) Pour un sol donné, la quantité d'eau oxygénée nécessaire à l'attaque complète n'est pas seulement fonction du taux de matière organique mais elle dépend aussi de la teneur en argile. Ainsi, elle tient compte de l'importance du complexe argilo-humique. En effet, l'attaque complète d'un échantillon de 30 g de terre, contenant 10 p. 100 de matière organique, exige une quantité d'eau oxygénée à 110 volumes qui est de :

— 20 ml, lorsque la teneur en argile est inférieure ou égale à 10 p. 100, c'est le cas des sols granitiques,

— 50 ml pour un pourcentage d'argile de 13 à 15 p. 100, type schisteux,

— 100 ml, dès que la teneur en argile dépasse 20 p. 100, type kersantitique.

Si le défaut d'eau oxygénée conduit à des erreurs non négligeables, en particulier, pour la détermination de la fraction argileuse, par contre, un excès, même important, ne modifie pas le pourcentage des différentes classes. C'est ce que met en évidence l'examen de l'échantillon de KERVOUYEC pour lequel la dose maximale est dix fois supérieure à la dose optimale.

III. — COMPARAISON AVEC LA MÉTHODE PIPETTE DE ROBINSON ET AVEC LE TAMISAGE

A. — Méthode pipette de ROBINSON

Sur les échantillons soumis aux mesures densimétriques, nous déterminons le pourcentage des fractions de diamètre égal ou inférieur à 2 μ et à 20 μ au moyen de la pipette de ROBINSON. L'expérience montre que ce dernier procédé fournit des résultats légèrement plus élevés que la méthode densimétrique ; ils le sont d'environ 5 p. 100 en valeur relative.

En ce qui concerne les particules de diamètre égal ou inférieur à 2 μ, pour les 130 échantillons étudiés, nous trouvons une différence de 5,4 p. 100. Il convient de remarquer que, dans le cas d'une attaque incomplète, les écarts entre les deux méthodes sont plus élevés et ils le sont d'autant plus que la quantité d'eau oxygénée pure utilisée est moins importante.

Pour la fraction inférieure à 20 μ, la différence moyenne de 130 échantillons est de 5,6 p. 100.

B. — Tamisage

Les échantillons, sur lesquels nous effectuons l'analyse granulométrique, sont, au préalable, passés sur un tamis d'ouverture 0,050 mm — AFNOR module 18 —. Après les mesures densimétriques, il est ainsi possible de faire une détermination pondérale de la fraction égale ou inférieure à 50 μ.

Les résultats obtenus par ce procédé sont supérieurs aux mesures densimétriques. La différence entre les deux procédés est d'environ 5 p. 100 pour les principaux types de sol de Bretagne — schiste, granulite, granite, grès, kersantite ; elle est de 4,8 p. 100 pour 28 sols étudiés. D'ailleurs, dans les analyses courantes, la somme des pourcentages de tous les éléments est comprise entre 94 et 100 p. 100.

Les mêmes opérations effectuées sur des types différents — limons du bassin de Rennes, sols de Belle-Ile-en-Mer — donnent, entre le tamisage et la densimétrie, des différences dépassant 15 p. 100.

L'examen du tableau 2 indique, d'une part, que la différence de comportement n'est pas liée à l'importance de la fraction égale ou inférieure à 50 μ ; c'est ce que mettent en évidence les comparaisons établies, tout d'abord, entre les échantillons 2, 7 et les échantillons 10, 11 et, ensuite, entre les échantillons 1, 3, 5 et les échantillons 8, 9.

D'autre part, les sols de Belle-Ile-en-Mer et du bassin de Rennes n'ont pas des taux d'argile et de limon foncièrement différents des autres types bretons. D'ailleurs, l'expérience montre que la méthode densimétrique donne, comme pour tous les sols étudiés, des résultats comparables à ceux de la méthode pipette de ROBINSON. Par contre, ils ont des teneurs en limon grossier très élevées ; alors que le pourcentage de cette fraction est voisin de 15 p. 100 pour l'ensemble des sols bretons, il atteint 30 p. 100 à Belle-Ile-en-Mer et 50 p. 100 dans les sols de limon du bassin de Rennes. Appliquée à ces sols, la méthode densimétrique diminue la valeur du limon grossier d'une façon trop importante et il en résulte que la somme des pourcentages de tous les éléments est toujours inférieure à 90 p. 100. Aussi, dans ce cas là, il convient de déterminer par tamisage, la fraction égale ou inférieure à 50 μ.

IV. — INFLUENCE DES VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE DE SÉDIMENTATION

En effectuant deux ou plusieurs mesures à la même température sur un même échantillon, nous obtenons des résultats identiques, la méthode est donc fidèle. Mais, à plusieurs reprises, il nous est arrivé de faire ces mesures à des températures

TABLEAU 2

Comparaison des résultats obtenus par les méthodes densimétrique (D), *Pipette de* ROBINSON (P) *et tamisage* (T).

Fractions granulométriques		1 Ty Nay (schiste micacé)	2 Pleyben (schiste de St-Lô)	3 Kermorvan (kersantite)	4 Kernazet (granulite)	5 Montaglan (granite)	6 Pail (grès)	7 Ty Pont (gley)	8 Belle-Ile-en-Mer (phyllade de St-Lô séricitique)	9 Belle-Ile-en-Mer (phyllade de St-Lô séricitique)	10 La Harpe (limon de Rennes)	11 La Harpe (limon de Rennes)
⩽ 50 μ	D	44	66,5	49,2	37,7	48,5	21	68,7	48,8	43,8	74,2	74,7
	T	46,7	68,7	49,7	38,8	51,2	23,1	69,3	59,3	54,6	83,2	88,7
⩽ 20 μ	D	31,5	49	37	27,7	33,8	12,8	62,2	23,5	22,3	35,6	34,5
	P	32	49,5	39	29,5	35,9	13,1	61,5	25,3	23,2	35,1	36,2
⩽ 2 μ	D	14,7	14	18,5	13,3	12,5	6,2	28,7	8,7	11	9,5	12,5
	P	15	14,5	19	14,1	13,8	6,6	28,8	8,2	11,6	9,5	13
Limon (2 μ-20 μ)	D	16,8	15	18,5	14,4	21,3	6,6	33,5	14,8	11,3	26,1	22
	P	17	15	20	15,4	22,1	6,5	32,7	17,1	11,6	25,6	23,2
Limon grossier (20 μ-50 μ)	D	12,5	17,5	12,2	10	14,7	8,2	6,5	25,3	21,5	38,6	40,2
	T-P	14,7	19,2	10,7	9,3	15,3	10	7,8	34	31,4	48,1	52,5

différentes les unes des autres ; les résultats alors obtenus, après l'application du terme correctif proposé, ne concordaient plus aussi bien. Cette observation nous a conduit à vérifier, sur les sols étudiés, l'importance des variations des résultats en fonction des modifications de la température de sédimentation. Il est entendu que la température reste constante pendant chaque série de mesures densimétriques.

Nous avons opéré sur 22 échantillons à des températures comprises entre 13° et 25°. Nous nous sommes limités aux lectures de la première heure de sédimentation, ce qui revient à déterminer le pourcentage des particules dont le diamètre est compris entre 8 μ et 50 μ.

A l'examen du tableau 3 qui représente les résultats bruts de 10 échantillons, nous constatons que l'application du terme correctif donne, entre les températures 13° et 25°, des écarts de l'ordre de 9. Par contre, les pourcentages bruts ne présentent entre eux que des écarts de l'ordre de 1,5, pour les mêmes températures extrêmes.

TABLEAU 3

Pourcentages bruts de plusieurs fractions granulométriques à différentes températures de sédimentation

Diamètre des particules		⩽ 50 μ			⩽ 31,5 μ			⩽ 20 μ			⩽ 12,5 μ			⩽ 8 μ		
Températures de sédimentation		25°	19°	13°	25°	19°	13°	25°	19°	13°	25°	19°	13°	25°	19°	13°
Pourcentages bruts	1	43,5	44	44,5	35,5	36	37,5	26,5	26	27,5	19	19	20	13,5	13	14
	2	48	48,5	50,5	36,5	37,5	38	24	25,5	27	17,5	19	19,5	12,5	13	13,5
	3	43	43,5	44	36	36	37	27,5	28	29,5	22,5	22,5	24	19,5	18	19,5
	4	47,5	47	48,5	39	40,5	41,5	30,5	31,5	32,5	24,5	24	24,5	20,5	19,5	19,5
	5	44,5	45,5	46,5	37,5	38,5	40	29,5	30	32,5	24	24	26	20	18	20
	6	49,5	49,5	51	42,5	43,5	45	35	35,5	37	29,5	29,5	31	25,5	25,5	26
	7	49	49,5	51	39,5	40	41	27	27	28	19	19	20	14,5	14	
	8	43	42,5	43,5	33	34,5	35	22,5	24	24	16	16	17	12,5	12,5	
	9	55	54,5	55	43	43,5	45	28	28,5	30	19,5	19	19,5			
	10	39	39	40	33	32,5	33,5	26	26	27	22	22,5	22			

En conséquence, il n'y a pas lieu d'appliquer le terme correctif proposé, aux sols de la région considérée, d'autant plus que, dans nos conditions opératoires, la températures de sédimentation se maintient au voisinage de 20° — entre 18° et 22° — et elle reste constante pendant toute la durée des mesures densimétriques.

V. — CONCLUSIONS

Ainsi, il apparaît que la méthode densimétrique est très valable pour l'analyse granulométrique de l'ensemble des sols de Bretagne ; il existe seulement quelques types de sols riches en limon grossier — 20 à 50 μ — pour lesquels la détermination de la fraction égale ou inférieure à 50 μ doit être faite par tamisage.

Il convient de réaliser une destruction complète de la matière organique liée aux particules de faible diamètre sinon les erreurs provoquées par un défaut d'eau oxygénée peuvent atteindre des proportions importantes. La quantité optimale d'eau oxygénée à 110 volumes, pour un échantillon de 30 g de terre, est de 20 ml dans le cas des sols granitiques, 50 ml si le sol est schisteux et 100 ml lorsque la teneur en argile atteint 20 p. 100.

Pour les sols étudiés, la méthode densimétrique donne des valeurs comparables à celles de la méthode pipette de ROBINSON. Mais l'expérience montre qu'il n'est pas opportun d'appliquer un terme correctif lorsque la température de sédimentation s'éloigne peu de 20°.

La méthode densimétrique permet d'obtenir les courbes caractéristiques des sols étudiés et, en outre, elle présente des avantages au point de vue manipulation. En tenant compte des remarques précédentes, elle est utilisée avec profit pour les analyses courantes où nous nous limitons à la détermination des trois principales classes : argile, limon et limon grossier.

Reçu pour publication en décembre 1962.

SUMMARY

THE APPLICATION OF THE DENSIMETRIC METHOD TO SOILS OF BRITTANY

The application of MÉRIAUX's method of physical analysis to the soils of Brittany is discussed

In the humiferous soils of the region surveyed, the destruction of organic matter in a 30 g sample of soil requires, at similar levels of nitrogen, a 33 p. 100 solution of H_2O_2 in amounts varying with the clay content. The volumes required amount to 20 ml for granitic soils of 10 p. 100 clay content, 50 ml for schistous soils of 15 p. 100 clay content, and 100 ml if the clay content reaches 20 p. 100.

With all soils of Brittany, the densimetric method yields values comparable to ROBINSON's pipette method for the determination of fractions lower than 2 μ and 20 μ. At the same time, sieving and MÉRIAUX's method both produce similar values in determinations of the fraction lower than 50 μ, mainly in soils which contain about 15 p. 100 of coarse silt of 20 to 50 μ particle size.

On the other hand, the densimetric method yields rather lower values than sieving if the coarse silt amounts to 30 and 50 p. 100 ; consequently, the fraction lower than 50 μ has to be determined by sieving in such soils.

If sedimentation occurs at a temperature other than 20°C, the suggested corrective factor turns out to be much too high.

In view of these findings, MÉRIAUX method can profitably be applied to the study of soils. The technique permits to obtain continual values of the distribution of particles according to their diameter and, consequently, it yields characteristic curves representing the soils studied ; furthermore, the short time required for analyses makes manipulation easy.

ZUSAMMENFASSUNG

ANWENDUNG DER DENSIMETRISCHEN METHODE AUF DIE BÖDEN DER BRETAGNE

Gegenwärtige Notiz betrifft die Anwendung der durch Mme MÉRIAUX verbesserten Methode der Korngrössenanalyse auf die Böden der Bretagne.

In den humösen Böden dieser Gegend benötigt die Zerstörung der organischen Masse einer Bodenprobe von 30 g, für einen gleichen Gehalt an Stickstoff, eine Menge reinen Wasserstoffsuperoxyds-H_2O_2 zu 33 p. 100-die je nach Tongehalt schwankt : 20 ml für Granitböden mit 10 p. 100 Ton, 50 ml für SchieferBöden mit 15 p. 100 Ton und 100 ml wenn der Prozentsatz 20 p. 100 erreicht.

In allen böden der Bretagne ergibt diese Methode Werte, die jenen der Pipettmethode von ROBINSON für die Bestimmung von Teilchen unter 2 μ und unter 20 μ gleich sind.

Desgleichen gibt ein Durchsieben und die Methode MÉRIAUX sehr naheliegende Zahlen für die Bestimmung der Fraktion unter 50 μ. Letztere Bemerkung gilt für die meisten Böden die ugf 15 p. 100 Groblehm enthalten (20 bis 50 μ).

Hingegen gibt diese Methode viel schwächere Werte wie diejenige des Durchsiebens wenn der Groblehm 30 und 50 p. 100 erreicht. In solchen Böden also muss die Fraktion unter 50 μ durch Sieben festgestellt werden.

Erfolgt die Sedimentiermethode bei Temperaturen, die von°C 20, abweichen, so stellt man fest, dass die vorgeschlagene Berichtigung zu hoch ist.

Trägt man diesen Bemerkungen Rechnung, so ist die Anwendung der Methode MÉRIAUX für das Studium der Böden äusserst zweckmässig. Mit ihr erreicht man eine fortwährende Verteilung der Bodenteilchen je nach Durchmesser und es ist möglich, die charakteristischen Kurven der untersuchten Böden darzustellen. Für laufende Untersuchungen bietet sie ausserdem den Vorteil einer leichteren Handhabung.

РЕЗЮМЭ

Применение денсиметрического метода при анализе почв Бретани.

Л. ДЮВАЛЬ (Кэмпер).

Об'ектом данной статьи-является применение к анализам почв Бретани механического метода разработанного г-жей Мэрио.

В гуммусоносных почвах разсматриваемого района, при одинаковом содержании азота, для разрушения органического вещества находящегося в пробе почвы весом в 30 гр. необходим об'ем чистой 33-х% перекиси водорода — H_2O_2, зависящий от количества глины содержащейся в пробе. Об'ем этот равен 20 мл для гранитических почв с 10-ю % глины, 50 мл для сланцев заключающих 15 % глины, и 100 мл в случаях когда процент глины достигает 20 %.

Для определения частиц от 2 μ до 50 μ денсиметрический метод дает для всех почв Бретани приблизительно те-же результаты, что и метод пипетки Робинсона. Просеивание и метод Мэрио дают цифры того-же порядка для определения фракций меньших 50-ти μ в почвах содержащих около 15-ти % фракций от 20 до 50 μ.

И напротив, — денсиметрический метод дает результаты менее удовлетворительные чем метод просеивания в случаях когда процент этих фракций достигает 30-50 %. Из этого вытекает что, для такового рода почв, частицы не достигающие 50 μ следует определять просеиванием.

Замечено также что, когда выпадение частиц протекает при иных чем в 20° температурах, предлагаемый коррективный термин — слишком велик.

Если принять во внимание все эти замечания, то можно с успехом применять метод Мэрио при изучении почв. Метод этот дает возможность получения плавного распределения частиц в зависимости от их диаметра и благодаря этому становится опять-таки возможным вывести характерные кривые изучаемых почв.

Кроме того, при обычных анализах, метод этот имеет преимущества в смысле манипуляций.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MERIAUX S., 1954. Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. *Ann. agron.*, 5-59, 149-205.

MERIAUX S., 1957. L'analyse granulométrique par densimétrie. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, 928-941.

Ann. agron., 1963, **14** (2), 227-238

631. 482. 1 ; 631. 415. 1 ; 631. 452

RELATIONS ENTRE LE DEGRÉ D'ACIDITÉ ET LE NIVEAU NUTRITIF DES SOLS D'ALLUVIONS ANCIENNES DE LA GARONNE

J. LIWERANT

avec la collaboration technique de J. R. MARTY

Station d'Agronomie, Toulouse (Haute-Garonne).

SOMMAIRE

Les sols d'alluvions anciennes du bassin de la Garonne, sols essentiellement limoneux, sont en grande majorité plus ou moins décalcifiés et acides. On s'est proposé de vérifier s'il y a une relation entre le degré d'acidification de ces sols et leur niveau nutritif.

L'étude a porté sur 25 parcelles d'un terrain de labour de constitution granulométrique relativement peu variable et dont les pH-eau s'échelonnent entre 6,8 et 5,75.

Le calcul des coefficients de corrélation et de régression fait ressortir une corrélation directe et étroite entre les teneurs en CaO, MgO, K_2O échangeables, P_2O_5 assimilable, azote total et carbone, et les valeurs du pH.

L'acidification de ces sols doit donc être considérée comme l'un des facteurs importants de leur production amoindrie. Des essais de recalcification sont poursuivis.

INTRODUCTION

Les alluvions anciennes de la Garonne et de ses affluents occupent dans l'Est du Bassin d'Aquitaine près de la moitié de la surface cultivée. Disposés en vastes plaines presque horizontales, ces terrains se prêtent bien à l'emploi des machines à grand travail. Par l'importance de leur superficie, ainsi que par leur topographie, les sols d'alluvions anciennes présentent un grand intérêt pour l'agriculture.

Leur constitution granulométrique est variable. On trouve dans des situations déterminées, un certain nombre de sols profonds à texture assez bien équilibrée. Mais la grande majorité sont des sols limono-argileux relativement peu profonds, à

prédominance d'éléments très fins (12-15 p. 100 d'argile, 60 p. 100 et plus d'éléments siliceux inférieurs à 50 microns), insuffisamment, pourvus en matières organiques totales (1 à 2 p. 100).

L'état calcique de ces sols est plus ou moins dégradé. L'examen d'un grand nombre d'échantillons a donné la répartition centésimale suivante (LIWERANT, 1939, 1941).

	pH > 6,5	25 p. 100
6,5 >	pH > 5,5	60 p. 100
	pH < 5,5	15 p. 100

Ces sols manifestent une tendance plus ou moins accusée à se « battre » ; on les désigne dans la région sous le terme de « boulbène ». Leur productivité est généralement amoindrie.

On admet, et des travaux récents semblent le confirmer (MERIAUX, 1958, 1961), que l'acidification des sols à texture fine se répercute défavorablement sur leur stabilité structurale et sur leur perméabilité. Mais l'effet de l'acidité ne se limite pas à la détérioration progressive des propriétés physiques de ces sols. La présente note se propose d'examiner ses répercussions sur les propriétés chimiques des sols, notamment sur le dynamisme des principaux éléments nutritifs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

On a pu trouver un terrain remplissant assez bien les conditions essentielles qu'exige une telle étude : constitution granulométrique relativement peu variable, mais différences notables de pH d'un endroit à l'autre, système de culture identique sur l'ensemble de la superficie depuis de longues années. Ce terrain d'alluvions anciennes de la Garonne est situé sur la terrasse a^{1c}, à Seilh (Haute-Garonne) ; le sol est de type « boulbène ».

Dispositif. — Sur le champ horizontal et apparemment homogène, on a tracé 25 parcelles de 49 m² (7 × 7), disposées en carré latin. Sur chaque parcelle, on a prélevé un échantillon de terre représentatif de la couche labourée, de 0 à 30 cm.

Antécédents. — Depuis 30 ans, le champ est soumis à un assolement quadriennal : deux années de céréales (blé, orge), une de plantes sarclées (pomme de terre, maïs-grain), une de divers (vesce, lin, légumes, etc.). Toutes les opérations culturales, ainsi que les résultats obtenus ont été consignés.

D'après ces renseignements, la fumure organique a été apportée régulièrement tous les 3 ou 4 ans, à raison de 20 à 25 t de fumier à l'ha, soit à la dose moyenne de 6 t/ha par an, pour l'ensemble de la période envisagée.

La fumure minérale, par contre, n'a été appliquée que d'une manière sporadique et à faible dose. Pendant cette période, le champ n'a reçu sous forme minérale, par ha et par an, que :

N : 10 kg P_2O_5 : 16 kg K_2O : 5 kg

Antérieurement à cette période, le terrain était exploité par un même fermier pendant plus de 30 ans. Celui-ci pratiquait une culture soignée, d'après les conceptions du début de ce siècle : labours multiples, peu profonds, à l'araire ; apports fréquents et abondants de fumier produit à la ferme ou amené de l'extérieur, mais aucun engrais minéral. La dose moyenne de fumier n'était pas inférieure à 10 t par ha et par an.

Méthodes analytiques

Bases échangeables :

Extraction par l'acétate d'ammonium neutre normal ; percolation dans des allonges avec 10 cc de réactif par gramme de terre.

P_2O_5 *assimilable* :
Extraction par une solution d'acide citrique à 2 p. 100.

Azote total :
Méthode Kjeldahl.

Carbone :
Méthode sulfochromique.

Réaction :
pH-eau sur terre séchée à l'air et passant au tamis de 2 mm ; rapport terre/eau = 1/2,5 ; température 20°C. On détermine le pH une minute environ après la mise en suspension de la terre. Des déterminations parallèles sur des prises effectuées sur un même échantillon de terre ont permis de constater la bonne reproductibilité des résultats (sensibilité du potentiomètre : 0,02 pH).

Besoin en CaO :
Méthode Hutch'nson — Mac Lennan.

RÉSULTATS ANALYTIQUES

Analyse physique

Les 25 échantillons représentatifs des parcelles ont été analysés séparément. Le tableau 1 donne les taux extrêmes et moyens ainsi que les coefficients de variabilité pour cent de chaque fraction granulométrique :

TABLEAU 1

Pour cent de terre fine

	Minimum	Maximum	Moyennes	Coefficient de variation
Sable grossier (2 à 0,2 mm)	4,4	4,9	4,6	3,5 %
Sable fin (0,2 à 0,05)	13,2	16,2	14,8	6,0 %
Sable très fin (0,05 à 0,02)	38,4	48,0	43,7	5,7 %
Limon (0,02 à 0,002)	20,1	24,2	21,8	5,0 %
Argile (< 0,002)	11,2	15,8	12,5	10,4 %

Pour l'ensemble des parcelles, les variations de la texture granulométrique sont relativement limitées. La variabilité n'est que de 5-6 p. 100 pour les éléments siliceux, mais s'élève à 10,4 p. 100 pour les colloïdes argileux.

Par la finesse de la granulométrie (77 p. 100 des éléments siliceux d'un diamètre inférieur à 0,05 mm), par son taux modéré d'argile (12,5 p. cent), ce sol est une « boulbène » typique.

pH et besoin en Ca O : Sur l'ensemble des parcelles,, le pH-eau varie de 6,8 à 5,75. Corrélativement, le besoin en CaO, déterminé d'après Hutchinson — Mac Lennan, varie de 84 à 350 mg par kg de terre (tableau 2).

Analyse chimique

Le tableau 2 donne les résultats classés dans l'ordre décroissant du pH.

TABLEAU 2

Pour mille de terre fine sèche

Parc. n°	pH eau	Besoin en CaO	P_2O_5 assim.	échangeable			Carbone	Azote total	C/N
				K_2O	CaO	MgO			
15	6,80	0,084	0,214	0,193	2,44	0,274	10,4	1,09	9,5
20	6,70	0,098	0,298	0,221	2,37	0,280	12,0	1,10	10,9
25	6,50	0,126	0,257	0,221	2,50	0,304	10,3	1,09	9,4
10	6,45	0,196	0,270	0,143	2,26	0,258	9,8	1,04	9,5
14	6,40	0,168	0,255	0,185	2,17	0,268	11,1	1,08	10,2
19	6,40	0,182	0,217	0,152	2,19	0,263	10,5	1,06	9,9
23	6,40	0,182	0,207	0,155	2,20	0,254	9,7	1,00	9,7
9	6,40	0,210	0,255	0,157	2,20	0,242	10,6	1,06	10,0
18	6,35	0,196	0,235	0,166	2,12	0,244	9,7	1,05	9,2
13	6,35	0,210	0,247	0,161	2,16	0,250	11,1	1,11	10,0
5	6,35	0,238	0,255	0,169	2,09	0,245	10,7	1,02	10,5
12	6,30	0,210	0,215	0,146	2,03	0,229	9,9	1,02	9,7
8	6,25	0,252	0,212	0,125	2,11	0,235	9,2	0,97	9,5
24	6,20	0,210	0,191	0 139	2,28	0,273	9,5	0,96	9,9
17	6,20	0,224	0,189	0,130	2,03	0,224	9,7	0,97	10,0
11	6,20	0,266	0,205	0,132	1,89	0,206	9,4	1,01	9,3
16	6,15	0,224	0,191	0,139	2,28	0,273	9,8	0,96	10,2
4	6,00	0,280	0,228	0,132	1,97	0,244	10,3	1,01	10,1
7	6,00	0,280	0,175	0,122	1,98	0,228	9,2	0,95	9,7
3	6,00	0,294	0,205	0,121	1,89	0,220	9,9	0,95	10,4
22	5,95	0,280	0,191	0,140	2,03	0,229	10,0	0,99	10,1
21	5,90	0,294	0,196	0,113	1,92	0,219	8,9	0,92	9,7
6	5,90	0,322	0,182	0,116	1,90	0,208	9,1	0,95	9,6
1	5,80	0,350	0,174	0,113	1,65	0,202	9,4	0,89	10,6
2	5,75	0,350	0,182	0,121	1,70	0,197	9,4	0,92	10,2

L'amplitude des variations de la composition chimique est résumée dans le tableau 3 :

TABLEAU 3

Pour mille de terre fine

	Minimum	Maximum	Moyennes	Coefficient de variation
Azote total	0,890	1,100	1,010	6,2 %
P_2O_5 assimilable	0,174	0,284	0,217	14,7 %
K_2O échangeable	0,113	0,221	0,149	20,6 %
CaO échangeable	1,650	2,500	2,090	10,0 %
MgO échangeable	0,197	0,304	0,243	11,2 %

On constate que la composition chimique varie, avec les parcelles, dans des limites bien plus larges que la constitution physique. Les coefficients de variation sont compris, sauf pour l'azote, entre 10,0 et 20,6 p. 100, alors qu'ils se situent entre 3,5 et 10,4 p. 100 pour la granulométrie.

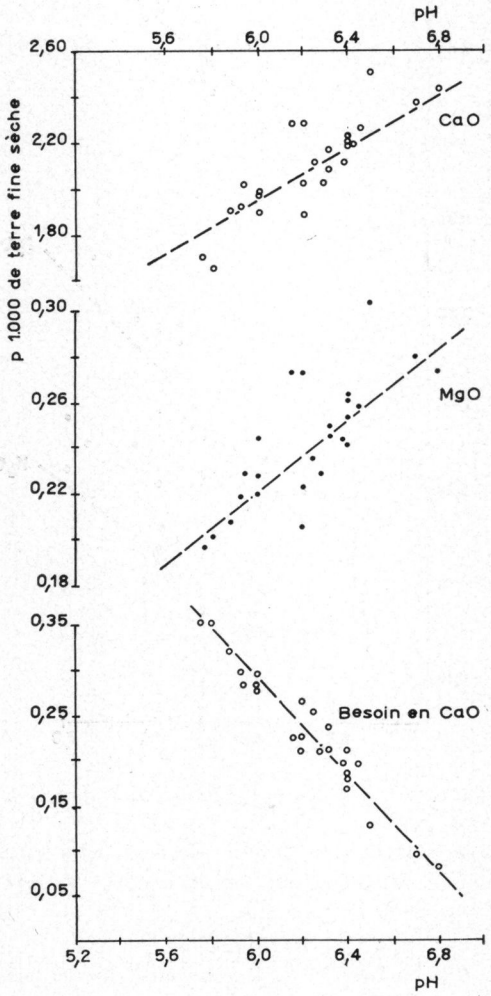


FIG. 1. — *Teneurs en* CaO, MgO *et besoin en* CaO *en fonction du* pH

D'autre part, le rapprochement entre les variations du taux d'argile (11,2 à 15,8 p. 100) et les résultats de l'analyse chimique n'a pas permis d'établir une relation entre ces variables. Par contre, les chiffres du tableau 2 font nettement ressortir une relation entre la valeur du pH et les taux des éléments nutritifs analysés. Les graphiques (fig. 1 et 2) permettent de considérer cette relation comme linéaire.

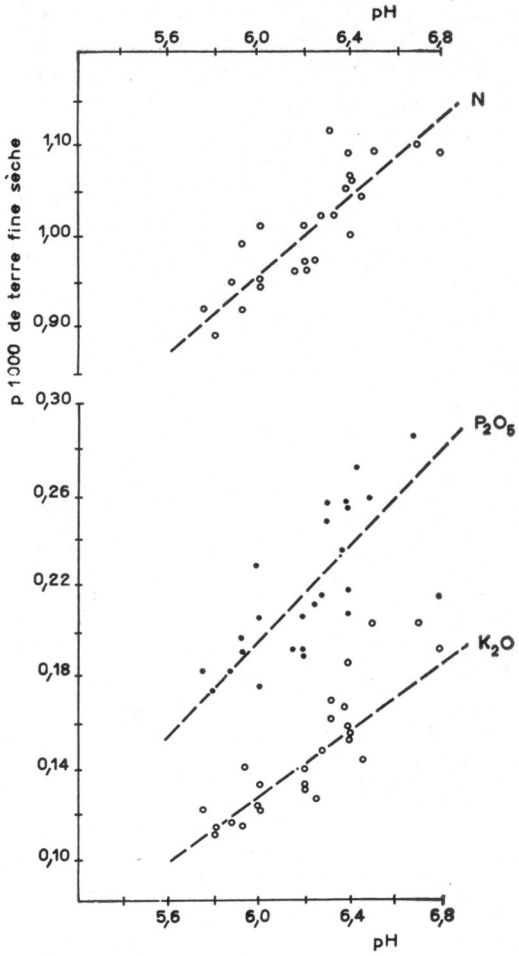


FIG 2. — *Teneurs en* N, P_2O_5, K_2O, *en fonction du* pH

La nature de cette relation est définie par les coefficients de corrélation et les coefficients de régression, calculés pour des intervalles de pH de 0,1 unité, en mg par kg de terre :

TABLEAU 4

Relation entre le pH *et le niveau d'éléments nutritifs*

	Coefficient de corrélation	Cœfficient de régression par 0,1 de pH
Azote total	+ 0,975	20 mg/kg
P_2O_5 assimilable	+ 0,755	8 mg/kg
K_2O échangeable	+ 0,894	10 mg/kg
CaO échangeable	+ 0,957	69 mg/kg
MgO échangeable	+ 0,935	8 mg/kg

Ces chiffres montrent une corrélation directe et élevée entre ces deux variables, ce qui revient à dire que toute diminution du pH entraîne une baisse correspondante du niveau des éléments nutritifs. L'importance de cette baisse, par 0,1 pH, est indiquée par les coefficients de régression ci-dessus.

Il convient de faire remarquer que ces données ne sont valables que pour l'intervalle de pH étudié : 6,8 à 5,8, c'est-à-dire pour les acidités modérées, mais la majorité des sols d'alluvions anciennes se trouvent dans ce cas. Sous l'influence des pH extrêmes, d'autres facteurs peuvent intervenir et modifier l'allure ou l'intensité des phénomènes.

DISCUSSION

Besoin en CaO *des sols acides*

La méthode généralement employée pour le déterminer est celle de HUTCHINSON — MAC LENNAN. On sait que cette méthode indique un besoin théorique qu'il convient de multiplier par un « facteur de chaulage » pour obtenir la dose de CaO réellement nécessaire pour réduire l'acidité du sol en place.

Les contrôles du pH dans les essais de recalcification, poursuivis depuis une dizaine d'années, ont permis de constater expérimentalement que le « facteur de chaulage » à appliquer aux sols d'alluvions anciennes se situe entre 2,5 et 3,0. Les résultats de cette étude apportent une justification de ce facteur.

En effet, d'après les données du tableau 2, les relations entre le pH d'une part, la teneur en CaO échangeable et le besoin théorique en CaO d'autre part s'établissent ainsi :

TABLEAU 5

Variation de la teneur en CaO *et du besoin en* CaO *en fonction du* pH

	Coefficient de corrélation	Coefficient de régression par 0,1 de pH
CaO échangable	+ 0,957	69 mg/kg
Besoin en CaO (HUTCHINSON — MAC LENNAN)	— 0,993	26 mg/kg

CaO échangeable et besoin théorique en CaO évoluent en sens inverse, mais leur variations sont loin d'être quantitativement les mêmes. En effet, lorsque le pH diminue de 0,1 unité, ce qui correspond à une perte de CaO échangeable de 69 mg/kg, le besoin en CaO évalué d'après HUTCHINSON n'augmente que de 26mg/kg. Le rapport 69/26 = 2,65 donne le « facteur de chaulage » à appliquer au besoin de CaO déterminé au laboratoire pour compenser les pertes réelles en CaO du sol en place. C'est cette dernière quantité de CaO qu'il convient d'appliquer, en une ou plusieurs fois, pour ramener le sol à la neutralité. La réaction se maintiendra au voisinage de la neutralité pendant quelques années, au moins.

K_2O *échangeable*

Les résultats analytiques montrent que la baisse du pH de 6,8 à 5,8 a pour conséquence une diminution sensible du taux de K_2O échangeable, de 221 à 113 ppm. Cette constatation est conforme aux conclusions auxquelles ont abouti les recherches de laboratoire de divers auteurs.

A. DEMOLON (1926) en faisant passer une solution de KCl à 1 p. 100 sur deux échantillons d'une même terre, l'un saturé de Ca à pH 7, l'autre décalcifié acide, a constaté que la terre acide fixe deux à trois fois moins de potassium sous forme échangeable que la terre neutre ; cette différence reste sensiblement la même après des applications répétées de KCl.

Cet auteur et d'autres ont établi que la quantité d'ions K qu'un sol est susceptible de fixer sous forme échangeable est d'autant plus élevé que son complexe absorbant est mieux pourvu en Ca. Dans les sols partiellement décalcifiés, les ions K non retenus sur le complexe absorbant par échange avec Ca, sont fixés sur certains minerais du sol sous forme inéchangeable ; ils peuvent aussi être partiellement éliminés par lessivage. Il en résulte qu'au fur et à mesure que le sol s'acidifie, le taux de K_2O échangeable baisse, comme le montre le tableau 2.

P_2O_5 *assimilable*

La baisse du taux de P_2O_5 assimilable, de 284 à 174 ppm, peut s'expliquer d'une manière analogue. On admet que les ions PO_4 se fixent sur le complexe absorbant, par l'intermédiaire du Ca, sous forme de combinaisons susceptibles de repasser en solution et d'être assimilées par les plantes. A mesure que le sol se décalcifie, des quantités croissantes d'ions PO_4 se fixent sous forme de combinaisons ferri- et alumino-silicique, considérées analytiquement comme inassimilables, quoique elles puissent dans certaines conditions contribuer à l'alimentation des plantes. L'acidification du milieu modifie l'équilibre entre ions PO_4 assimilables, et inassimilables, au détriment des premiers.

Les relations directes entre le niveau de K_2O et P_2O_5 accessibles aux plantes et la dégradation de la capacité d'échange des sols acides sont bien établies. Il n'en est pas de même en ce qui concerne l'effet de l'acidification du milieu sur le niveau et la nature de la matière organique du sol.

Matière organique, azote, rapport C/N

Les résultats analytiques révèlent que dans les sols étudiés, l'acidification du milieu s'accompagne d'une nette tendance à la diminution du taux de matière organique et d'azote. Le rapport C/N varie peu autour de 10, et les faibles variations ne semblent pas être en relation avec celles du pH. Cette constatation s'écarte de l'opinion généralement admise, d'après laquelle l'acidité du milieu a pour effet une accumulation dans le sol d'une matière organique à C/N élevé.

Il convient d'observer que les travaux sur lesquels est basée cette opinion ont porté plus particulièrement sur des sols non arables et fortement acides (pH $< 5,5$) : podzols forestiers, landes, tourbes, prairies naturelles, etc. Par contre, l'influence d'une acidité modérée (pH $> 5,5$) sur l'évolution de la matière organique dans les

sols arables depuis longtemps cultivés a été peu étudiée. On trouve cependant dans la littérature un certain nombre de renseignements ayant trait à ce sujet.

D'après WAKSMAN, le nombre de bactéries nitrificatrices par g de terre diminue considérablement avec l'acidification du milieu :

pH	7,0	6,8	6,6	6,4	6,2
Bactéries (milliers)	55	25	6	3,5	1

D'autres bactéries, notamment les fixatrices d'azote atmosphérique, libres ou symbiotiques, sont également très sensibles à la réaction du milieu. D'après divers auteurs, leur activité est déprimée par de faibles acidités, et elles passent à l'état de vie ralentie à pH inférieur à 5,8.

D'autre part, HUTCHINSON et MAC LENNAN, en neutralisant progressivement un sol acide par des doses croissantes de CaO ont constaté une prolifération intense de la flore bactérienne. Le nombre de bactéries par gramme de terre est passé successivement de 4 millions à 11, 82, 170 et 906 millions, au voisinage de la neutralité. Près d'un milliard de bactéries, d'un poids total d'un mg environ, par gramme de terre, représentent pour la couche arable une masse de plusieurs tonnes à l'ha de matière protéique, constituée par le protoplasme des cellules bactériennes.

D'après KRASSILNIKOV (1944) la longévité moyenne des cellules bactériennes pendant la belle saison est de 15 à 20 jours ; par conséquent, de nombreuses générations de bactéries se succèdent au cours du cycle annuel. Ceci signifie qu'une masse importante de matière organique se renouvèle constamment dans la rhizosphère, par la multiplication et la mort des cellules bactériennes.

On admet que deux processus inverses se poursuivent simultanément dans le sol. D'une part la minéralisation de la matière organique constituée par les débris de végétaux et les corps de microorganismes morts. D'autre part, la synthèse organique à partir des éléments minéraux libres du sol ou libérés par minéralisation, ainsi que de l'azote atmosphérique assimilé par certaines bactéries. Le mécanisme intime de ces processus est encore insuffisamment connu. Mais, d'après ce que l'on sait sur les exigences spécifiques de divers groupes de microorganismes, on peut supposer que dans les sols arables régulièrement ameublis par les façons culturales, la minéralisation est moins affectée que la synthèse organique par l'acidification du milieu. Dans cette hypothèse, le bilan de l'activité biologique, dans les sols arables acides serait négatif, au moins à certaines époques de l'année.

En effet, on considère que pendant que le sol est couvert par une culture, l'azote, à mesure de sa libération, est presque en totalité absorbé par les plantes. Mais les sols arables restent généralement nus de juillet à novembre, parfois jusqu'en avril. Dans les sols sensiblement neutres, l'azote libéré pendant cette période est, en partie, assimilé par les microorganismes. Transmis de génération en génération, il échappe au lessivage par les eaux pluviales, jusqu'à ce que les plantes de la culture suivante viennent le disputer aux microorganismes. Avec l'acidification du milieu et le ralentissement des processus de synthèse qui en résulte, une proportion importante de l'azote minéralisé pendant la période de jachère est éliminée de la couche arable par lixiviation. Les pertes d'azote s'accompagnent de pertes de carbonne, volatilisé sous forme de CO_2, d'où la quasi-stabilité du rapport C/N au voisinage de 10.

D'une manière générale, le niveau de matières organiques dans les sols arables

de la zone tempérée est réglée par un ensemble de facteurs qui relèvent à la fois de la nature du sol, de sa situation dans le relief, de la pluviosité, de l'action de l'homme, etc. Toutes conditions étant les mêmes, l'acidification progressive des sols étudiés a pour conséquence leur appauvrissement lent mais continu en matières organiques et corrélativement en azote total. Ce phénomène peut s'expliquer par l'altération des propriétés physiques et chimiques des sols acides et son influence défavorable sur l'activité de la microflore, et aussi sur la croissance des végétaux cultivés qui, de ce fait, laissent dans le sol moins de résidus organiques.

CONCLUSIONS

L'acidification progressive des sols d'alluvions anciennes du bassin de la Garonne, sols à texture fine et à complexe absorbant plutôt restreint, a pour résultat une perte continue de leur fertilité chimique.

Lorsqu'un sol sensiblement neutre évolue et que son pH s'abaisse à 5,75, le complexe absorbant a perdu 30 p. 100 environ de sa teneur initiale en CaO et MgO échangeables. La dégradation de sa capacité d'échange entraîne une baisse du niveau de K_2O échangeable de l'ordre de 50 p. 100, et de celui de P_2O_5 assimilable, de 40 p. cent environ. Dans ces mêmes conditions, la baisse du taux de matières organiques et d'azote peut atteindre 20 p. 100, ce qui n'est pas négligeable, si l'on considère que les variations de la teneur des sols en matière organique sont généralement très lentes.

Ces sols manifestent, en outre, une tendance à se « battre » et à « s'encroûter », indice d'une détérioration plus ou moins prononcée de leur structure. Le développement radiculaire des plantes s'en trouve déprimé et les conditions de leur approvisionnement en eau et en air deviennent défectueuses.

En définitive, l'ensemble des processus dont le sol est le siège et qui conditionnent le développement et la croissance des plantes se trouve affecté par l'acidification du milieu. Celle-ci doit être considérée comme l'un des facteurs les plus importants de la productivité amoindrie de ces sols.

Dans quelle mesure la correction de l'acidité peut-elle modifier favorablement les propriétés de ces sols et contribuer à l'augmentation progressive de leur productivité ? Des essais de recalcification, poursuivis depuis plusieurs années, ont fourni quelques renseignements sur ce sujet. Les résultats détaillés de ces essais feront l'objet d'une note séparée.

Reçu pour publication en novembre 1962.

SUMMARY

RELATIONSHIP BETWEEN THE ACIDITY AND NUTRIENT CONTENT OF ANCIENT ALLUVIA OF THE GARONNE

Most of the ancient alluvia of the Garonne basin, mainly loamy soils (50-60 p. 100 particles of 2-50 μ diameter, and 12-15 p. 100 of less than 2 μ diameter), are more or less decalcified and are acid. The relationships between the degree of acidity and their nutrient content was investigated on 25 plots of relatively equal mechanical composition and of pH values ranging between 6.8 and 5.75.

Within this range of soil reaction, the nutrient content of the arable layer (0-30 cm) showed the following variations :

Exchangeable CaO	0.25	— 0.165	%
Exchangeable MgO	0.0304	— 0.0107	%
Exchangeable K_2O	0.0221	— 0.9113	%
Available P_2O_5	0.0284	— 0.0174	%
Total N	0.11	— 0.089	%
Carbon	1.11	— 0.89	%

Calculation of the coefficients of correlation and regression showed a direct and close relationship between the concentrations of these nutrients and the pH values. Progressive acidification resulted in a slow but continuous decrease in nutrient concentrations.

These soils also exhibit a tendency to compaction and crusting, as a result of the greater or lesser alteration of their structure.

It is concluded that the acidification of these soils is one the most important factor in the decrease of their productivity. Liming experiments are in progress with a view to determining to what extent this relationship with acidity may be improved.

ZUSAMMENFASSUNG

BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEM SÄUERUNGSGRAD UND DEM NÄHRSTOFF-NIVEAU DER ALTEN ALLUVIALBÖDEN DER GARONNE.

Die alten Alluvialböden des Garonne-Beckens, hauptsächlich lehmige Böden (50-60 p. 100 Feinerdeteilchen von 2 bis 50 μ und 12-15 p. 100 unter 2 μ) sind grösstenteils mehr oder weniger dekalzifierts oder sauer. Wir nahmen uns vor, festzustellen, ob eine Beziehung zwischen dem Säuerungsgrad und dem Nährstoff-Niveau im Boden besteht.

Die Studien bezogen sich auf 25 Parzellen Ackerboden mit verhältnismässig geringem Unterschied in der Kormgrössenverteilung, deren Wasser-pH zwischen 6,8 und 5,75 liegen.

Die Bodenelemente der Ackerkrume (0-30 cm), bewegen sich in diesem pH-Raum in folgenden Grenzen, pro 1 000 :

Austauschbares CaO	von	2,50	bis	1,65
Austauschbares MgO	von	0,304	bis	0,197
Austauschbares K_2O	von	0,221	bis	0,113
Assimilierbare P_2O_5	von	0,284	bis	0,174
Gesamtstickstoff	von	1,10	bis	0,89
Koffenstoff	von	11,10	bis	8,90

Die Berechnung der Korrelations- und Regressionskoeffizienten zeigt eine direkte und enge Korrelation zwischen obigen Bodenelementen und den pH-Werten, oder anders gesagt, zieht eine fortwährende Versauerung dieser Böden ein langsames Absinken ihres Nährstoff-Niveaus nach sich.

Andrerseits zeigen diese Böden eine Neigung zum Zusammenschlagen und Verkrustung als Folge de mehr oder wenig ausgesprochenen Verwitterung ihrer Struktur.

Die Versauerung dieser Böden muss als einer der wichtigsten Faktoren ihrer Ertragsminderung angesehen werden. Die Rekazifier-ungsversuche gehen weiter um festzustellen, in welchem Masse die Korrelation der Bodensäure sie Berbessern könnte.

РЕЗЮМЭ

Соотношение между степенью кислотности и питательным уровнем древне-аллювионных почв Гаронны.

Ж. ЛИВЕРАНТ (Тулуза).

Почвы древних отложений Бассейна Гаронны почти исключительно суглинисты (50-60 % частиц от 2 до 50 μ и от 12 до 15 % частиц с диаметром не превышающим 2 μ), в большинетве своем сильно выщелочены и большой кислотности. Представляло интерес проверить существование некоторого соотношения между степенью кислотности этих почв и их питательным уровнем.

Двадцать пять делянок пахотной почвы с относительно однообразным гранулометрическим составом и с веером pH почвенных растворов от 6,8 до 5,75, были отведены под опыт. В данном интервалле pH, пахотный слой (0-33 См. глуб.) почвы содержал следующие количества различных элементов на 1 000 почвы :

CaO обменного от 2,50 до 1,65;
MgO обменного от 0,304 до 0,197;
K_2O обменного от 0,221 до 0,113;
P_2O_5 усвояемого от 0,284 до 0,174;
Азота общего от 1,10 до 0,89;
Углекислоты от 11,10 до 8,90.

Вычисление коэффициентов корреляции и регрессии привело к доказательству тесной и прямой зависимости между количествами вышеуказанных элементов в почве и размерами pH. Иначе говоря, прогрессивное увеличение кислотности этих почв, вызывает медленное но непрерывное понижение их питательного уровня.

С другой стороны, в результате более или менее крупных изменений их структуры у почв этих наблюдается тенденция к « заплыванию поверхности » и « коркообразованию ».

В заключение можно сказать что закисление этих почв нужно разсматривать как одну из главных причин их обеднения. Опыты рекальцификации продолжаются, чтобы определить в какой мере исправление кислотности способно улучшить их продуктивность.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DEMOLON A., 1926. In DEMOLON A., *La dynamique du sol*, 236, 4e édi. Dunod, Paris.
KRASSILNIKOV N. A., 1944. La masse microbienne de la rhizosphère (en russe). *Agrobiologyia*, 4.
LIWERANT J., 1939. Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne. *Ann. agron.*, 438-453.
LIWERANT J., 1941. Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne. *Ann. agron.*, 59-82.
MERIAUX S., 1958. Stabilité stucturale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.*, 799-803.
MERIAUX S., 1961. Action du chaulage sur les composants de la structure et sur l'état de saturation du sol. *C. R. Acad. Agric.*, 322-325.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 10-5-1963.

Dépôt légal : 2e trimestre 1963. N° d'mpression : 612

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1963, **14** (3), 239-260.

635 458 : 635.414.324

BILAN DES CATIONS ÉCHANGEABLES EN SOLS LESSIVÉS

Elisabeth LEFEBVRE-DROUET et Suzanne MÉRIAUX

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon (Côte-d'Or)

SOMMAIRE

Dans les profils de sols lessivés à pseudo-gley, le taux de saturation en bases à pH 7 augmente très fortement de l'horizon A à l'horizon C, tandis que le pH se maintient sensiblement constant. Les données de bases sont soumises à un examen critique. La nature de l'argile est étudiée. Enfin, des bilans de cations sont établis à des pH variables en tenant compte de l'aluminium, et la notion de charges variables avec le pH est envisagée pour expliquer le phénomène constaté.

INTRODUCTION

Au cours des études pédologiques entreprises en Bourgogne dans la Plaine de la Saône, nous avons fréquemment constaté le long des profils de sols lessivés à pseudo-gley une divergence importante entre la variation du taux de saturation en bases et celle du pH (MÉRIAUX et *al.*, 1957, MÉRIAUX et GILLY, 1958, et travaux non publiés). Tandis qu'avec la profondeur le pH ne subit qu'une très faible augmentation, le taux de saturation en cations évolue dans de très larges limites.

D'autres auteurs, DECKERS et VANSTALLEN (1955), ont cherché à établir une relation entre ces deux variables sur des sols divers de l'Ardenne et de la Famenne. Ils ont indiqué une corrélation générale très lâche, surtout pour des pH compris entre 4,5 et 5,5. Pour des profils semblables à ceux que nous avons étudiés, et sous même couvert, ils ont constaté une absence totale de liaison entre pH et taux de saturation.

BLANCHET et *al.* (1960), dans leurs travaux sur l'aluminium échangeable des sols, ont précisé la nature de l'acidité d'échange. Ils signalent que les différents critères d'expression de l'acidité du sol ne sont pas souvent en accord et que « la relation entre le pH et le degré de saturation est parfois très lâche ».

Ce manque de corrélation semble donc assez général, mais dans les profils de sols lessivés de la Plaine de la Saône, la divergence constatée est si fréquente et si accusée qu'elle nous a paru justifier une recherche plus approfondie. Dans ce sens, nous avons donc procédé à un examen critique des données de base, puis à l'étude de la fraction argileuse et enfin à l'établissement du bilan des cations échangeables en fonction du pH d'échange.

MATÉRIEL UTILISÉ ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1°) Matériel

Un profil caractéristique des sols de type lessivé à pseudo-gley a été choisi dans la forêt de Citeaux. Son évolution et la composition de ses colloïdes minéraux avaient été étudiés antérieurement (Mériaux et *al.*, 1960). Quelques données analytiques sont résumées dans le tableau 1. L'examen de ce tableau montre que le fer, l'argile et en conséquence la capacité d'échange de cations croissent jusqu'à l'horizon B. Les cations augmentent aussi dans le même sens, mais leur variation est plus forte que celle de la capacité d'échange, ce qui se traduit par un accroissement important du taux de saturation S_4/C. E. qui varie de 36 à 94,5 p. 100. Par contre, le relèvement du pH avec la profondeur est sensiblement moindre (4,8 à 5,3).

TABLEAU I

	Argile %	Fer libre ‰	Matière organique % (1,72 C)	C/N	pH H_2O	SiO_2/Al_2O_3 de l'argile	Capacité d'échange méq/100 g	Ca éch.	Mg éch.	K éch.	Na éch.	S_4/C. E.
A_1	12,5	0,8	2,0	16,0	4,8		6,8	1,5	0,7	0,20	0,16	37,6
A_2	12,5	0,8	1,4	15,5	4,8	2,50	6,1	1,4	0,5	0,14	0,17	36
A_2B	29,5	2,1	0,8	11,2	5,1	2,26	11,5	5,2	1,9	0,15	0,20	64,8
B	49,5	3,0	0,8	6,8	5,3	2,47	19,4	14,5	5,3	0,24	0,34	94,5
C	45	3,0	0,5	5,0	5,2	2,47	19	11,5	2,6	0,23	0,30	77

2°) Techniques

a) *Mesure du* pH

Deux techniques ont été employées :

α) Mesure potentiométrique dans diverses solutions salines (eau, Cl_2Ca M/100, ClKN). Le rapport sol/solution est de 1/1.

β) Mesure colorimétrique en solution Cl_2Ca M/100.

Le pH a été mesuré sur la terre sèche et, dans certains cas, sur la terre humide aussitôt après le prélèvement.

b) *Capacité d'échange et cations alcalins et alcalino-terreux*

La capacité d'échange est déterminée par distillation de la terre après percolation par une solution normale d'acétate d'ammonium tamponnée à pH 7 ou à différents pH ; l'excès de NH_4 est éliminé par quatre lavages à l'alcool éthylique et la distillation est faite en présence de magnésie ou occasionnellement de soude. Les cations échangeables Ca, Mg, K, Na, sont dosés dans le filtrat suivant les techniques habituelles :

— Ca et Mg par les complexons ;
— K et Na par photométrie de flamme.

c) *Ammonium fixé et capacité de fixation*

Nous avons employé la technique décrite par DHARIWAL et STEVENSON (1958).

d) *Acidité d'échange*

Elle a été mesurée par titrimétrie sur des solutions extraites à différents pH par percolation à l'aide des solutions suivantes :

α) solution normale de CH_3COONH_4 à pH 7 : les ions H^+ sont dosés dans le filtrat avec NaOH, le point de virage à pH 7 étant déterminé à l'aide d'un potentiomètre.

β) solution $BaCl_2$ tamponnée à pH 8,2 par la triéthanolamine : méthode MEHLICH (1948). L'acidité d'échange est dosée par titrimétrie.

γ) solution d'un sel neutre non tamponné : méthode de KAPPEN TCHERNOV modifiée par GILLY (1958) et méthode de YUAN (1949). Les ions H ou Al libérés par l'échange avec une solution N de KCl sont dosés par titrimétrie à pH 8,2.

e) *Aluminium*

Deux méthodes ont été employées :

α) *Titrimétrie* : technique de GILLY (1958) et YUAN (1959).

β) *Colorimétrie* : le dosage est effectué avec l'aluminon selon la technique indiquée par CHARLOT et BEZIER (1949) modifiée par BLANCHET (1960) après extraction, soit par KCl (N), soit par CH_3COO NH_4.

f) *Courbes de saturation*

Les saturations ont été faites par $Ca(OH)^2$ sur la terre et sur l'argile extraite de ces terres avec un rapport sol/solution de 1/2,5 et un contact d'une demi-heure.

Les courbes ont été déterminées expérimentalement d'une part sur les terres telles quelles ou mélangées à du sable fin afin d'obtenir un taux d'argile constant et voisin de 12 p. 100, d'autre part sur les fractions inférieures à 2 μ des horizons A_2 et C, après dilution aux 9/10 par du sable. La concentration en argile de la suspension était de 4 p. 100.

EXAMEN CRITIQUE DES DONNÉES NUMÉRIQUES INITIALES

Afin de pouvoir affirmer la divergence de variation du pH et du taux de saturation, toutes les données ont été soumises à un examen critique et les possibilités d'erreur sur chacune des valeurs ont été envisagées.

1°) Le pH

Afin d'être assuré que le pH mesuré représentait bien le phénomène réel, d'autres techniques ont été mises en œuvre. Les résultats (tableau 2) confirment la très faible amplitude des variations du pH le long du profil quelle que soit la méthode employée. Ce phénomène est donc indépendant de la différence éventuelle de concentration saline entre le sol et le sous-sol, ainsi que de la présence dans les horizons profonds d'une nappe perchée temporaire entraînant pendant plusieurs mois des conditions réductrices.

TABLEAU 2

	pH électrométrique sur terre sèche		pH colorimétrique sur terre sèche Cl_2Ca M/100	pH H_2O sur terre fraîche	
	pH Cl_2Ca M/100	pH ClK		immédiatement	après 5 jours de ressuyage
A_1	4,2	3,8	4,2	5,2	4,9
A_2	4,3	3,8	4,2	5,2	4,9
A_2B	4,4	3,7	4,2	5,4	4,7
B	4,5	3,5	4,4	4,9	4,7
C	4,5	3,6	4,4	5,2	5,0

2°) La capacité d'échange

Mesurée après percolation par l'acétate d'ammonium à pH 7, elle pourrait être sous-estimée pour plusieurs raisons :

a) *Fixation de* NH_4.

Par l'argile des échantillons du sous-sol, ainsi que nous l'avons indiqué sur des profils de même type de la plaine de la Saône (Gouny et *al.*, 1960). Les déterminations de NH_4 fixé et de la capacité de fixation de NH_4 montrent (tableau 3) que NH_4

TABLEAU 3

	NH_4 fixé méq/100 g	Capacité de fixation de NH_4 méq/100 g	NH_4 fixable méq/100 g	Ca déplacé (méq/100 g)	
				par CH_3COONH_4	par ClNa
A_2	0,45	0,55	0,10	6,1	5,5
C	0,80	2,05	1,25	17,2	17,2

fixable s'élève respectivement à 0,10 et 1,25 méq pour 100 g dans les échantillons A_2 et C. Ces valeurs qui se situent dans la limite de l'erreur expérimentale sur la détermination de la capacité d'échange, ne peuvent suffire à expliquer le taux de saturation élevé de l'horizon C.

b) *Mauvais déplacement de* NH_4 *à la distillation.*

Des essais comparatifs de déplacement par MgO et NaOH pour la distillation ont été entrepris sur A_2 et C.

Les résultats sont les suivants :

	MgO	NaOH	Écart relatif à MgO
	—	—	—
A_2	6,35	7,25	14,2 %
	6,45	7,47	15,6 %
	6,50	7,50	15,4 %
C	17,1	19,2	12,1 %
	17,2	19,4	12,8 %

NaOH déplace environ 15 p. 100 d'ammonium de plus que MgO dans l'horizon A_2. Dans l'horizon C, ce pourcentage est un peu inférieur (12,5 p. 100). Il semble toutefois difficile de considérer la quantité de NH_4 déplacée par NaOH comme représentant le mieux les ions NH_4 ayant déplacé les cations échangeables du sol. En effet, pour certains auteurs, NaOH déplacerait aussi les ions NH_4 fixés.

Notons toutefois que si le surplus de NH_4 déplacé par NaOH correspond bien pour l'horizon C à la capacité de fixation de NH_4, il représente pour l'horizon A_2 environ le double de cette capacité de fixation.

c) *Déplacement incomplet de* Ca *par* NH_4.

On peut supposer, d'après SAWHNEY et *al.* (1959), que dans un sol contenant de l'illite et de la vermiculite, NH_4 déplace incomplètement Ca et qu'ainsi la valeur obtenue pour la capacité d'échange est sous-estimée. Nous avons dans ce but, après saturation de deux séries d'échantillons par Cl_2Ca, percolé l'une des séries par CH_3COO NH_4, l'autre par ClNa. Les résultats (tableau 3) montrent que, dans le cas des terres étudiées, NH_4 ne déplace pas moins de Ca que Na.

d) *Adsorption possible de* H *avec* NH_4 *pendant la percolation.*

Pour vérifier cette hypothèse émise par BARSHAD (1954) nous avons, après saturation de la terre par Ca, percolé à l'aide de CH_3COO NH_4, distillé la terre saturée de NH_4 et dosé Ca dans le percolat.

	NH_4 distillé	Ca déplacé
	—	—
A_2	6,45	5,6
C	17,1	17,6

Ainsi que le montrent les chiffres, la relation est bonne entre Ca déplacé et NH_4 distillé. L'hypothèse d'une adsorption de H avec NH_4 au cours de la percolation par une solution de CH_3COO NH_4 neutre n'est pas à retenir.

e) *Fixation d'anions avec* NH_4.

La capacité d'échange pourrait être faussée par une adsorption d'anion. Nous avons d'abord comparé sur l'horizon C le comportement de l'anion Cl^- par rapport à l'anion CH_3COO^-. La valeur de la capacité d'échange est identique et les cations sont échangés en même quantité puisqu'il s'agit du même cation NH_4.

	C. E.	Ca	Mg	K	Na	S_4 = Somme des bases
	—	—	—	—	—	—
$CH_2COO\ NH_4$	19	11,5	2,6	0,23	0,30	14,53
$Cl\ NH_4$	20	12,0	1,8	0,47	0,34	14,61

Nous avons ensuite vérifié la fixation possible de CH_3COO^- qui se traduirait par un entraînement par distillation de cet anion volatil. Après percolation par $CH_3COO\ NH_4$ et élimination de l'excès, puis traitement par Na pour déplacer NH_4, la terre est distillée avec PO_4H_3. Les quantités entraînées, déduction faite de l'à-blanc sont les suivantes :

	CH_3COO^- méq/100 g
	—
A_2.....	0,35
C	0,9

La fixation d'anions n'intervient donc pratiquement pas dans la détermination de la capacité d'échange.

3°) Les cations dosés

La technique habituelle d'échange des cations ne prévoyant pas l'élimination des sels solubles, ces derniers pourraient fausser par excès les bases échangeables. Divers auteurs ont en effet observé dans des sols hydromorphes une accumulation de calcium due à la nappe temporaire dans les horizons d'accumulation.

Pour les horizons A_2 et C, les sels solubles ont été dosés. Leurs principaux cations se répartissent ainsi (en méq/100 g) :

	Ca	K	Na	Total
	—	—	—	—
A_2	0,150	0,025	0,040	0,215
C	0,100	0,002	0,087	0,188

Les cations des sels solubles sont donc en quantité négligeable par rapport aux cations échangeables.

En conclusion, les données initiales telles que le pH, la capacité d'échange et les cations dosés sont valables. La divergence constatée ne peut s'expliquer par une erreur sur ces valeurs.

ÉTUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE

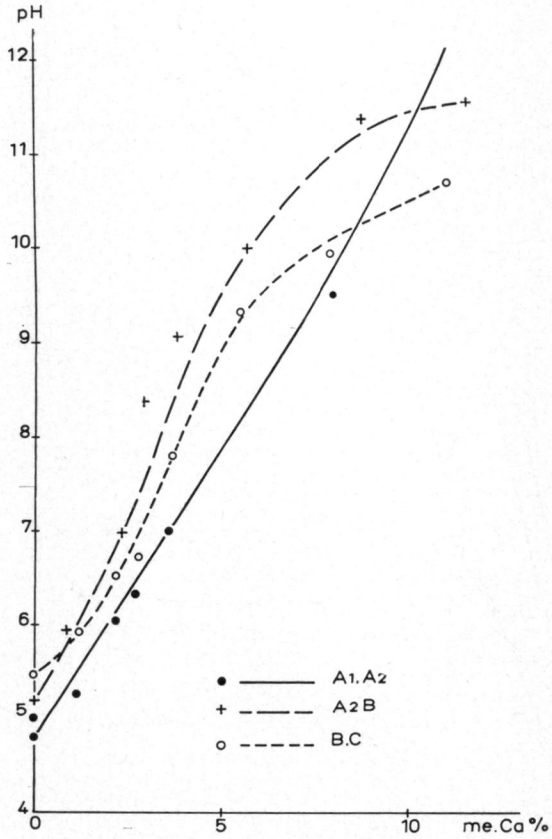
Cette étude a été entreprise en vue de rechercher si une différence de nature de l'argile le long du profil ne serait pas responsable de la variation du taux de saturation en cations et expliquer ainsi le phénomène observé.

Dans ce but, un certain nombre de déterminations ont été faites.

1°) Courbes de saturation

a) *Terres*

Les courbes de saturation ont été faites sur tous les horizons du profil. Sur graphique 1, les courbes des échantillons non dilués par du sable sont assez semblables au départ quel que soit l'horizon. Les quantités de Ca nécessaires pour atteindre pH 7 ne



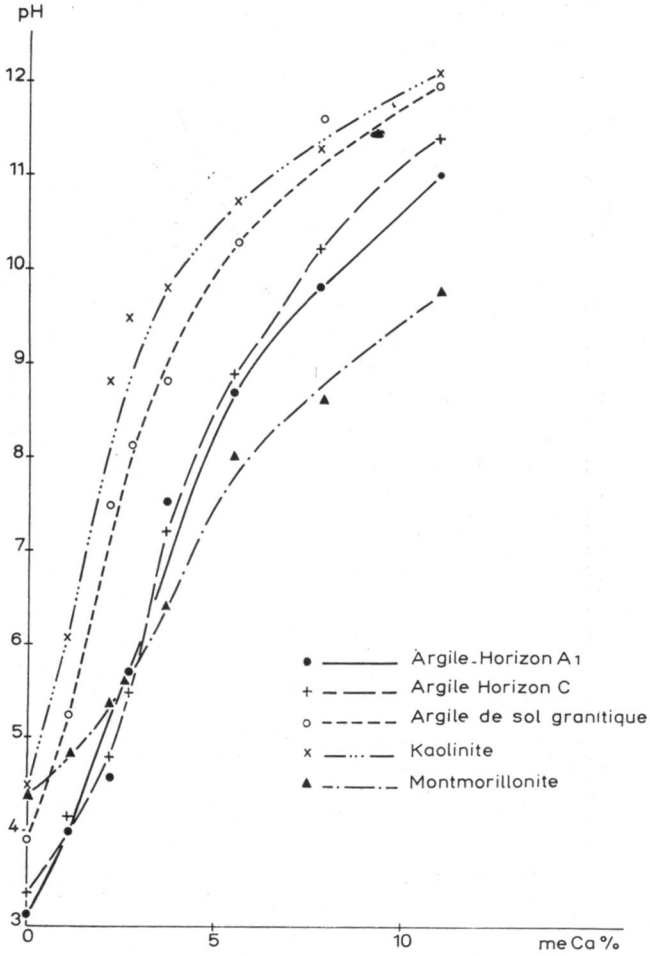
Graphique 1

sont pas très différentes, bien que les rapports des taux d'argile soient de 1 à 4 entre A_2 et C. Par contre, aux pH supérieurs, les courbes divergent : celle des horizons A_1 et A_2 étant linéaire, tandis que pour les horizons profonds, elle s'infléchit davantage.

Pour les échantillons dilués par du sable jusqu'à obtention d'un taux d'argile constant et voisin de 12 p. 100, les courbes ne sont pas notablement différentes des précédentes.

b) *Argiles*

Les fractions granulométriques inférieures à 2 μ ont été diluées aux 9/10 par du sable. Les horizons A_2 et C ont ainsi des courbes de saturation sensiblement identiques (graphique 2). Ces données permettent déjà de conclure à l'identité de nature du matériel argileux de long du profil.



Graphique 2

Pour situer ces argiles dans la gamme des argiles minéralogiquement pures, des courbes de saturation ont été déterminées sur une kaolinite, une montmorillonite ainsi que sur une argile d'origine granitique formée de 40 p. 100 de kaolinite et de 60 p. 100 de vermiculite. Les courbes des horizons A_2 et C sont assez voisines de celles de la kaolinite et de l'argile granitique.

2°) Composition chimique de l'argile

L'examen du tableau 4 montre, en particulier, la constance du rapport SiO_2/Al_2O_3 le long du profil. Nous en avions antérieurement conclu à l'identité de nature de l'argile dans les différents horizons pédologiques (Mériaux et *al.*, 1960).

TABLEAU 4

Composition chimique de la fraction argileuse (R. Grosman, 1960)

Horizon	A_2	A_2B	B	C
Silice non attaquée %	14,9	9,4	5,5	5,6
Silice attaquée %	34,5	37,7	41,3	41,5
Silice % moléculaire	0,575	0,628	0,688	0,691
Somme des sesquioxydes %	32,4	35,8	35,4	35,5
TiO_2 %	1,61	1,21	0,97	0,94
Fe_2O_3 %	6,14	5,71	5,31	5,66
Fe_2O_3 % moléculaire	0,038	0,035	0,033	0,035
P_2O_5 %	1,14	0,58	0,55	0,42
Al_2O_3 %	23,52	28,30	28,50	28,53
Al_2O_3 % moléculaire	0,230	0,277	0,280	0,280
MnO_2 %	0,142	0,089	0,005	0,023
K_2O %	0,90	0,91	0,82	0,79
Na_2O %	0,17	0,20	0,19	0,19
CaO %	0,34	0,40	0,99	0,75
MgO %	0,93	1,17	1,08	1,11
SiO_2/Al_2O_3	2,50	2,27	2,46	2,47
$SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	2,14	2,01	2,20	2,20

L'analyse chimique des argiles de ces sols les situerait dans la gamme des illites probablement en mélange avec de la kaolinite. Il faut toutefois signaler la très faible teneur en K_2O du matériel étudié.

La capacité d'échange de l'argile, pour les horizons A_2 et C est respectivement égale à 30,5 et 41,0 méq pour 100 g.

3°) Mesure des surfaces et analyse de l'argile aux rayons X

Ces déterminations ont été exécutées par J. Chaussidon à la Station centrale d'Agronomie.

a) *Surface totale*

Elle a été mesurée à 600°C par rétention de l'éthylène-glycol (méthode de Hendricks et Dyal). La surface spécifique est égale à 86 m² par gramme pour l'horizon A_2 et 135 m² par gramme pour l'horizon C. L'absence de fixation de l'éthylène-glycol entre les feuillets exclut la présence de montmorillonite dans ces argiles. La surface spécifique est de l'ordre de grandeur de celle d'une illite. Elle est plus élevée dans l'horizon C que dans l'horizon A_2 ; cette supériorité est à rapprocher de celle que nous avons observée dans les valeurs de la capacité d'échange de la fraction argileuse. Ainsi l'horizon C est, pour ces deux caractéristiques, égal à environ 1,4 fois l'horizon A_2

b) *Analyses aux rayons X*

Les diagrammes ont été obtenus sur des films orientés car les mesures sur des poudres étaient impossibles à réaliser. Ils mettent en évidence la présence de quartz, de kaolinite et peut-être d'une phyllite à 10 Å dont seule l'équidistance 4,98 Å a pu être observée.

Bien que cette détermination de la nature de l'argile ne soit pas absolument complète, elle est très concluante car elle montre une identité quasi absolue entre les fractions argileuses des deux horizons.

En résumé, toutes les déterminations concourent à démontrer que la nature de l'argile de ce profil n'est pas responsable de la divergence de variation entre le taux de saturation et le pH.

BILAN DES CATIONS ÉCHANGEABLES

Le fait brut initial ayant été confirmé et la nature de l'argile n'étant pas en cause, nous avons étudié le bilan des cations échangeables pour les horizons A_2 et C.

1°) Acidité d'échange

Nous comprenons sous ce vocable l'ensemble des ions libérés par l'échange et dosés par une base. C'est ce que la plupart des auteurs ont appelé H échangeable et que, plus récemment, on a reconnu être formé de Al et H échangeables (Tchernov, 1956, Gastuche, 1957, Laudelout, 1958, Gilly, 1958, Blanchet, 1960).

Elle a été mesurée par les techniques précédemment décrites.

Les résultats sont les suivants (en méq pour 100 g) :

	ClK				$CH_3COO\ NH_4$ pH 7	Cl_2Ba + T.E.A. pH 8,2
	Gilly		Yuan			
	Al + H	H	Al + H	H		
A_2	1,38	0,05	1,77	0,57	6,5	10,0
C	2,28	0,40	2,71	0,37	5,3	8,0

La divergence constatée entre les résultats obtenus par les différents réactifs d'extraction est liée au pH auquel ont lieu les échanges. Les solutions non tamponnées de ClK acidifient le milieu et l'échange se fait à un pH un peu inférieur à celui du sol, c'est-à-dire aux environs de 4. Par contre, les deux autres réactifs tamponnés amènent le sol à leur pH respectif et l'acidité dosée est ainsi plus élevée.

La comparaison des deux méthodes de dosage de Gilly et Yuan, après échange

par ClK, montre que l'acidité d'échange est plus élevée par la dernière technique qui comporte un temps de contact plus long que la première. Dans le cas de l'horizon C, cette acidité totale correspond à une quantité plus grande l'Al extrait.

2°) Nature de l'acidité d'échange

Nous avons cherché à connaître quelle était l'importance de Al dans l'acidité d'échange. Les résultats consignés dans le tableau 5 montrent l'influence du pH d'échange sur la quantité d'ions Al dosables. A pH 7, Al n'est pratiquement pas déplacé car il est précipité sous forme de $Al(OH)_3$ tandis qu'à pH 4, sa solubilité est appré-

TABLEAU 5

	Al échangeable			µéq Al (ClK) par g d'argile
	$CH_3COO\ NH_4$ (pH 7)	ClK		
		méq/100 g	% de C. E.	
A_1	0,27	1,25	18	100
A_2	0,14	1,40	23	112
A_2B	traces	2,41	22	82
B	0	2,95	15	60
C	0	2,15	11	48

ciable. Ces résultats sont conformes à ceux de R. Blanchet et ses collaborateurs (1960). Il est important toutefois de noter que, pour cet auteur, les solutions de chlorures n'extraient des quantités importantes d'aluminium que dans les sols et sous-sols désaturés (S/C.E. < 60 p. 100) et acides. Pour notre profil, où le taux de saturation (S/C. E.) varie de 36 à 95 p. 100, avec un pH presque uniforme et voisin de 5,0, les quantités d'Al libérées sont importantes et croissent avec la capacité d'échange C. E. et le taux d'argile. Ces derniers résultats sont d'ailleurs en concordance avec ceux de Gilly (1958) sur un profil voisin. M. C. Gastuche (1957) a calculé pour la face plane brucitique et les faces latérales d'une kaolinite de 15,5 m^2/g de surface externe la valeur de 94 µéq d'Al par gramme.

Le rapport d'Al échangeable à la capacité d'échange et à l'argile est plus élevé dans les horizons A que dans les horizons B et C.

En d'autres termes, il semble que l'aluminisation de l'argile soit plus importante dans les échantillons de surface qu'en profondeur. Ce fait peut être lié à l'acidité un peu supérieure des horizons superficiels entraînant une extraction plus grande d'Al par ClK.

3°) Bilan des cations a pH 7

Le bilan des cations à pH 7 a été établi, pour l'ensemble du profil, d'une part à l'aide des données précédentes concernant l'acidité d'échange, d'autre part avec les données des courbes de saturation par $Ca(OH)^2$.

a) *Bilan à partir de l'acidité de la solution percolée après échange à* CH_3COONH_4

Les données en sont reproduites dans le tableau 6.

TABLEAU 6

	N_1 = Acidité d'échange (méq)	S_4 = Ca + Mg + K + Na	$S_4 + N_1$	Capacité d'échange
A_1	6,0	2,56	8,58	6,8
A_2	6,5	2,21	8,71	6,1
A_2B	6,0	7,45	13,45	11,5
B	6,0	18,38	24,38	19,4
C	5,3	14,63	19,93	19,0

D'après ce tableau, la somme de tous les cations excède la valeur de la capacité d'échange. Ce fait est probablement dû au manque de précision de la mesure de l'acidité d'échange en milieu tamponné. Si cette mesure était exacte, il faudrait admettre la présence de formes d'Al telles que $Al(OH)^2$ donnant lieu à la réaction suivante :

$$Al(OH)^2 + H_2O \rightarrow Al(OH)^3 + H^+$$

b) *Bilan à partir des courbes de saturation*

Les quantités de Ca nécessaires pour atteindre pH 7 sont les suivantes (N_2 = en méq pour 100 g de terre).

	N_2 = Ca ajouté jusqu'à pH 7	$S_4 + N_2$	$(S_4 + N_2)$/C. E.
A_1	3,6	6,2	91
A_2	2,9	5,1	83,5
A_2B	2,3	9,75	85
B	3,0	21,38	> 100
C	2,5	17,1	91

Les quantités de Ca ajoutées pour atteindre pH 7 permettent d'assurer approximativement le bilan.

4°) BILAN DES CATIONS A pH CROISSANT

a) *Variation de la capacité d'échange avec le* pH

La forte progression constatée le long du profil du taux de saturation en cations pourrait être expliquée par une variation irrégulière de la capacité d'échange en fonction du pH. Afin d'étudier cette possibilité nous avons, pour chacune des terres des horizons A_2 et C, mesuré la capacité d'échange de pH 2,6 à pH 11 à l'aide d'un

TABLEAU 7

Variation de la capacité d'échange et des bases en fonction du pH *d'échange. Horizon* A_2
(*Résultats en méq/*100 *g*)

pH d'échange	C. E.	Ca	Mg	K	Na	S_4 = total 4 bases	100 S_4/C. E.	Al	$S_5 = S_4 + Al$	100 S_5/C. E.
2,55	0,2	1,2	1,5	0,15	0,09	2,94		2,4	5,34	
3	1,8	1	1,6	0,14	0,08	2,82	> 100	2,16	4,98	> 100
3,35	3,15	1	1,7	0,15	0,08	2,93	92,5	2,63	5,56	> 100
3,7	3,85	1	1,7	0,16	0,08	2,94	77	2,64	5,58	> 100
4,1	4,4	1	1,6	0,15	0,08	2,83	64	2,53	5,36	> 100
4,3	4,65	1,3	1,3	0,15	0,09	2,84	60	2,63	5,47	> 100
4,5	4,95	1,1	1,4	0,15	0,08	2,73	55	2,3	5,03	> 100
4,9	5	1	1,7	0,15	0,09	2,94	59	2,1	5,04	100
5,15	5,45	1,4	1,3	0,15	0,10	2,95	54	1,75	4,70	86
5,35	5,1	1,5	1,2	0,15	0,10	2,95	58	1,86	4,81	94
5,5	5,4	1,3	1,7	0,15	0,12	3,27	50	1,0	4,27	79
5,7	5,5	1,5	1,1	0,15	0,11	2,86	52	0,51	3,37	61
6,05	5,85	1,4	1,1	0,15	0,14	2,79	48	0,14	2,93	50
6,3	5,9	1,4	0,9	0,13	0,13	2,56	43	0,12	2,68	45
6,6	5,95	1,4	0,9	0,14	0,15	2,59	44	0,10	2,69	45
6,8	6,3	1,3	1	0,15	0,13	2,58	41	0,11	2,69	43
7,4	6,6	1,3	0,9	0,15	0,14	2,49	38	0,12	2,61	40
8,25	6,8	1,3	1	0,15	0,13	2,58	38	0,14	2,72	40
9,65	6,85	1,1	0,3	0,15	0,17	1,72	25		1,72	25

TABLEAU 8

Variation de la capacité d'échange et des bases en fonction du pH *d'échange. Horizon C*
(Résultats en méq/100 g)

pH d'échange	C. E.	Ca	Mg	K	Na	S_4 = total 4 bases	100 S_4/C. E.	Al	$S_5 = S_4 + Al$	100 S_5/C.E.
2,45	0,2	8,2	2,3	0,16	0,28	10,94		0,46-0,36		
3	7,6	9,8	2,7	0,2	0,25	12,95	> 100	0,7	13,85	> 100
3,35	11,75	10,3	2,7	0,2	0,26	13,46	> 100	1,62	15,08	> 100
3,7	14,55	10,4	2,7	0,2	0,25	13,55	93	3,14	16,69	> 100
4,1	16,0	10,2	3	0,21	0,26	13,67	85	3,08	16,75	> 100
4,22	16,55	10,4	3,2	0,21	0,31	14,12	85			
4,5	16,65	10,3	3,1	0,20	0,27	13,87	84	2,91	16,78	100
4,9	17,45	10,6	2,9	0,20	0,27	13,97	80	2,35	16,32	93
5,07	17,2	10,8	2,9	0,22	0,31	14,23	83	2,17	16,40	96
5,24	17	10,4	2,9	0,3	0,32	13,92	82	0,6	14,52	85
5,45	17,1	11,1	2,7	0,21	0,31	14,32	84	0,4	14,72	86
5,52	16,9	10,5	2,7	0,20	0,29	13,69	81	0,34	14,03	80
5,67	17,35	10,7	2,6	0,20	0,28	13,78	79	0,12	13,90	80
6	17,7	10,8	2,9	0,21	0,28	14,19	80,5	0,11	14,30	81
6,2	17,45	10,9	2,7	0,23	0,28	14,11	81	0,05	14,16	81
6,4	17,8	10,8	2,6	0,21	0,30	13,91	78	0,085	13,99	79
6,7		10,6	2,9	0,20	0,30	14		0,05	14,05	
7,05	17,8	11	2,5	0,20	0,30	14	78,5	0,046	14,05	78
8,7	18,3	10,5	2,6	0,20	0,30	13,6	74	0,06	13,66	74
9,95	19,04	10	0,5	0,20	0,29	10,99	58,5	0,10	11,19	59
10,95	19,4	0,5	0,5	0,13	0,30	1,43	7,4		1,43	7,4

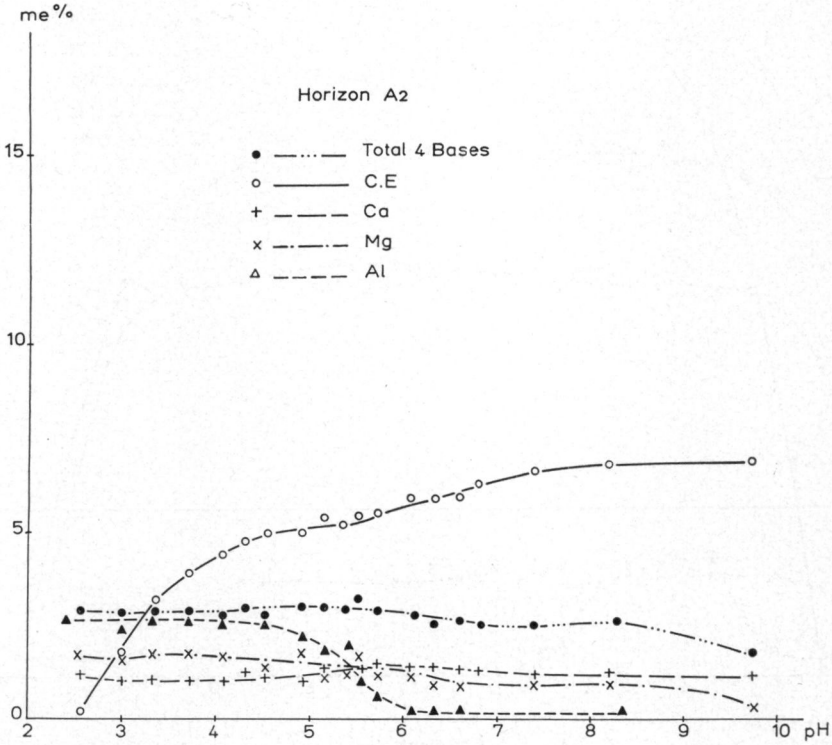
mélange tampon en proportions variables de CH_3COOH et de NH_4OH. Le même travail a été fait à partir de CH_3COOH et $Ca(OH)_2$: les deux mélanges-tampons donnent d'ailleurs des résultats à peu près identiques.

Nous ne considérerons ici que la capacité d'échange mesurée par NH_4 (tabl. 7 et 8).

Les courbes de variation de la capacité d'échange des horizons A_2 et C en fonction du pH sont différentes.

Aux erreurs de mesure près, la capacité d'échange de l'horizon A_2 a augmenté régulièrement avec le pH entre 4 et 8 (graphique 3).

Par contre, pour l'horizon C, elle croît assez fortement jusqu'à pH 5, puis varie assez peu jusqu'à pH 8 (graphique 4).



Graphique 3

b) *Variation des cations échangeables avec le* pH

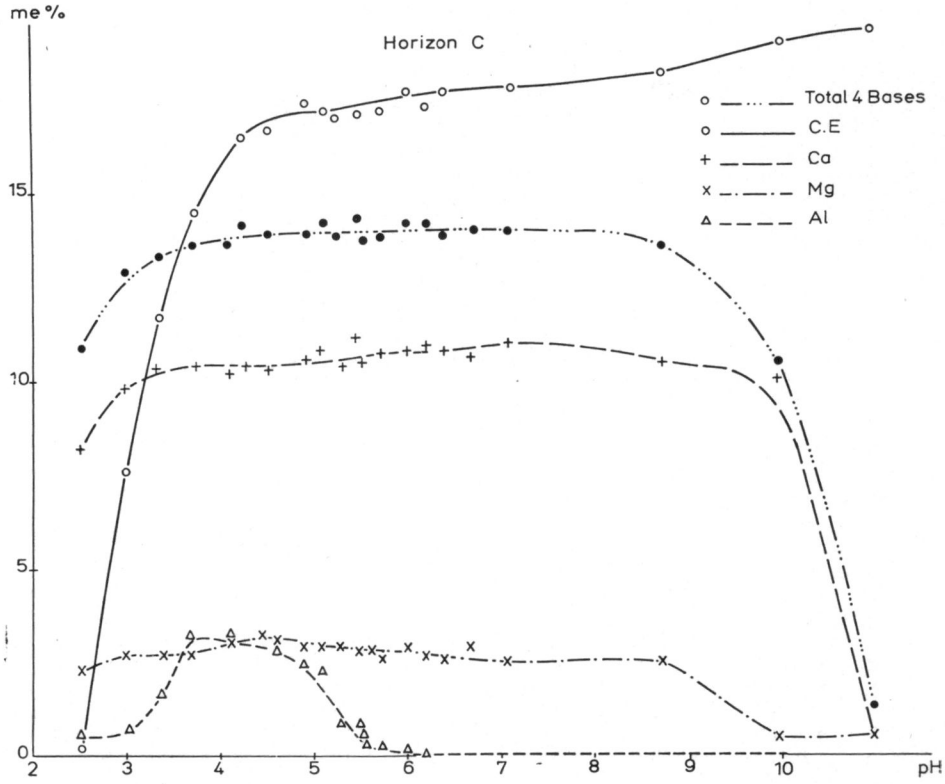
Les 5 cations suivants ont été dosés dans la solution après échange : Ca, Mg, K, Na et Al (tableaux 7 et 8). Leur variation est figurée sur les graphiques 3 et 4.

Entre pH 3,5 et 8, la somme S_4 des alcalino-terreux et des alcalins extraits (ces derniers étant en très faible proportion) décroît très faiblement dans l'horizon A_2 quand le pH s'élève. Dans l'horizon C, S_4 est à peu près constant quel que soit le pH d'échange.

Par contre, la variation d'Al extrait en fonction du pH, à peu près semblable pour les deux horizons, est la suivante : maximum aux environs de pH 3,7, décrois-

sance d'abord modérée jusqu'à pH 5,2 environ, puis brusque jusqu'à une valeur nulle à pH 6. Les quantités d'Al extraites sont du même ordre dans les deux horizons, mais elles représentent une fraction de la capacité d'échange de 41 p. 100 en A_2 et de 13 p. 100 en C. Ces chiffres renforcent la constatation précédemment faite d'une aluminisation plus poussée de l'argile de A_2.

Ces données, globalement conformes aux idées des auteurs déjà cités, mettent toutefois en évidence la possibilité d'extraction de quantités importantes d'Al à



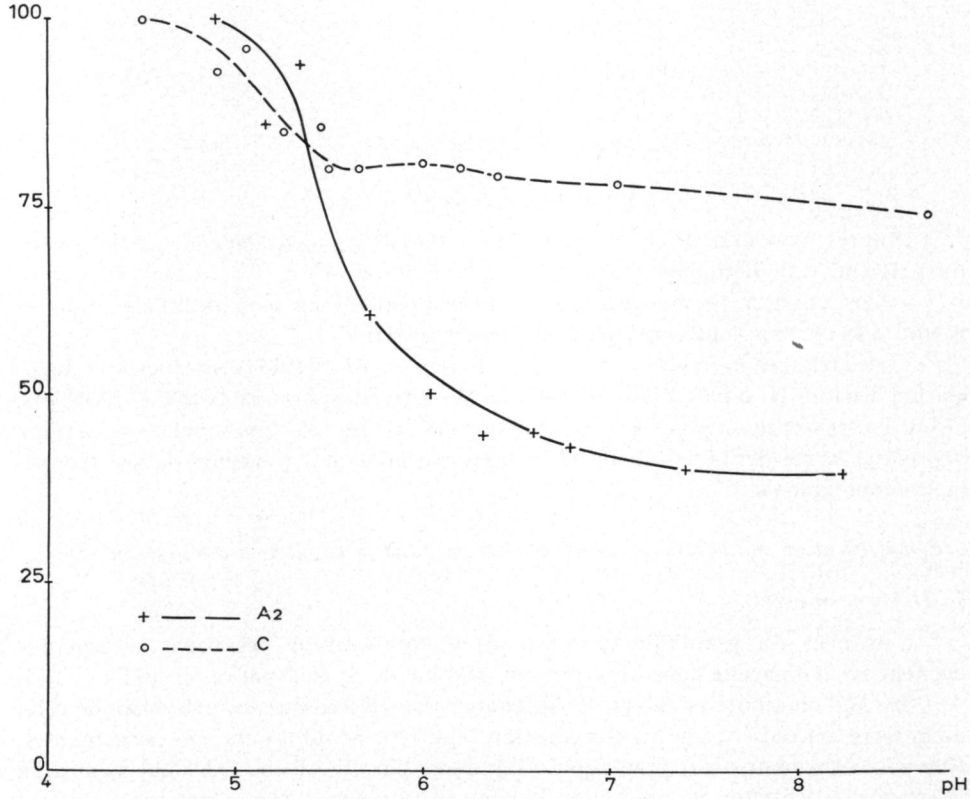
Graphique 4

pH 5. A ce pH, on considère (CHARLOT, 1957, BLANCHET et *al.*, 1960) que la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium est à peu près totale en solution diluée. Il faut admettre qu'à ce pH ce sont les formes $Al(OH)^+$ et $Al(OH)^{2+}$ qui prédominent et libèrent Al au contact des ions H de la solution.

Si l'on compare les quantités d'Al échangées par ClK à celles qui figurent dans les tableaux 7 et 8, on constate que le mélange tampon, à un pH égal ou inférieur à celui de la terre, extrait davantage d'Al que ClK. Cette observation est valable surtout dans le cas de l'horizon A_2. Elle est en accord avec les constatations de P. F. PRATT et F. L. BAIR (1961) selon lesquelles l'acétate extrait plus de Al que ClK quand le pH du sol est supérieur au pH tampon de la solution d'acétate.

c) *Variation du taux de saturation avec le* pH

Si l'on considère le taux de saturation en cinq cations (100 S_5/C. E.), il apparaît que, au pH du sol voisin de 5, le bilan des cations échangeables est complet pour les deux horizons. *C'est donc que l'acidité naturelle de ces horizons et par extension, de tout le profil, est due exclusivement à l'aluminium.*



Graphique 5

Mais l'allure de la courbe représentative de la variation (graphique 5), pour chaque horizon, du taux de saturation en fonction du pH d'échange, montre que l'identité de nature de A_2 et C se limite à ce point. En effet, elles divergent dès pH 5,5 : la courbe de l'horizon A_2 s'infléchit notablement plus que celle de l'horizon C qui reste presque parallèle à l'axe des abcisses.

A pH 7, les taux de saturation des horizons A_2 et C sont respectivement égaux à 42 et 78, valeurs contrastées qui avaient constitué le point de départ de ces travaux.

En résumé, les terres de pH voisin de 5,0 se comportent dans les conditions naturelles de façon identique vis-à-vis de l'échange des cations. Leur acidité est due à l'aluminium échangeable grâce auquel le bilan des cations échangeables est complet.

Il reste à expliquer la raison du comportement différent des deux terres quand elles sont amenées à des pH supérieurs à 5,5.

5°) Interprétations des bilans

a) *Composition globale de la capacité d'échange*

La capacité d'échange est liée aux colloïdes : argile seule pour l'horizon C, argile et matière organique pour l'horizon A_2.

D'après la valeur de la capacité d'échange de la fraction argileuse de chaque horizon, la capacité d'échange de la matière organique peut être calculée :

	A_2	C
Capacité d'échange mesurée méq/100 g.	6,3-6,8	17,8-19
Participation de la fraction argileuse méq/100 g	3,8	18,5
Participation de la matière organique méq/100 g.	2,5	
Capacité d'échange calculée de la matière organique méq/100 g.	180-210	

b) *Origine de la capacité d'échange*

D'après Schoffield, la charge d'un minéral argileux dépend partiellement du pH. On peut distinguer :

— les charges permanentes dues aux substitutions isomorphiques dans le réseau. Ces charges sont constantes en dessous de pH 5.

— les charges variables avec le pH à partir de pH 6. Elles sont dues à la dissociation des ions H^+ à partir des OH des couches tétraédriques aux bords des feuillets.

Coleman et *al.* (1959) signalent que dans le cas des sols contenant de la matière organique, cette dernière affecte les charges variables par plusieurs de ses groupements fonctionnels.

c) *Intervention de chaque catégorie de charges dans la capacité d'échange du profil*

α) *Horizon minéral.*

L'examen du graphique 2 ainsi que le commentaire des pages précédentes mettent en évidence la constance presque absolue de S_4 en fonction du pH.

Si à S_4 l'on ajoute la valeur de Al échangeable déterminée au pH voisin de celui de la terre, on obtient une valeur constante qui représente les charges permanentes. Elle peut être figurée sur graphique comme une parallèle à l'axe des abcisses (pH). Il est normal en effet de considérer Al comme une valeur fixe car sa précipitation, quand le pH s'élève, entraîne une libération équivalente d'ions H.

L'écart entre la capacité d'échange et S_4 et Al maximum va croissant avec le pH. Il représente les charges variables dues à l'argile.

On peut estimer pour un pH de 7 la participation de l'argile dans ces charges variables. Ce calcul est fait à partir de deux séries de résultats représentant des valeurs extrêmes :

C. E. pH 7	17,8 méq	19 méq
S_4 + Al	16,4 méq	17,0 méq
H des charges variables	1,4 méq	2,0 méq
Taux d'argile	45 %	45 %
Participation spécifique de l'argile aux charges variables	3 méq/100 g	4,4 méq/100 g
Fraction de la capacité d'échange de l'argile intervenant à pH 7 dans les charges variables	7,5 %	11,0 %

Russel cite la valeur de 5,4 méq pour une montmorillonite de 100 méq/100 g.

β) *Horizon A_2.*

Pour cet horizon, le calcul s'établit comme suit :

C. E. pH 7	6,3 méq	6,1 méq
S_4 + Al	4,7 méq	4,3 méq
H des charges variables	1,6 méq	1,8 méq
Intervention de l'argile dans les charges variables,	0,40-0,55 méq	0,40-0,55 méq
Intervention de la matière organique dans les charges variables	1,20-1,05	1,40-1,25
Participation spécifique de la matière organique aux charges variables.	85-75 méq pour 100 g de mat. org.	100-90 méq pour 100 g de mat. org.

La moitié environ de la capacité d'échange présumée de la matière organique participe de façon apparente aux charges variables. La fraction restante, bien que correspondant elle aussi à la même catégorie de charges, échappe au bilan en raison de ses possibilités de dissociation à très bas pH.

Ainsi, dans l'horizon A_2 encore humifère, les charges variables avec le pH sont sensiblement plus élevées que dans l'horizon C exclusivement minéral. La participation de ces charges variables explique le comportement différent des deux horizons tel qu'on peut le constater à l'occasion de la mesure de la capacité d'échange à pH 7.

CONCLUSION

Cette étude confirme la réalité d'un phénomène très fréquemment observé dans les sols lessivés à pseudo-gley de la Plaine de la Saône : le taux de saturation en bases à pH 7 augmente très fortement de l'horizon A à l'horizon C tandis que le pH se maintient sensiblement constant.

Des erreurs possibles sur les différentes mesures ne sont pas susceptibles de rendre compte de ce phénomène ; l'étude de la nature des minéraux argileux des différentes couches ne l'est pas davantage. Il faut faire appel aux bilans de cations pour montrer qu'au pH du sol voisin de 5, l'acidité est due exclusivement à l'aluminium échangeable.

Mais le taux de saturation en cations Ca, Mg, K, Na et Al varie avec le pH de façon très différente selon qu'il s'agit de couches superficielles ou profondes. C'est la notion de charges permanentes et de charges variables avec le pH qui permet d'interpréter par l'action de la matière organique l'importance des ions H dans les horizons de surface à pH 7 et d'expliquer en totalité le phénomène constaté.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. BARBIER de l'intérêt qu'il a montré pour ce travail ainsi que de ses conseils éclairés, et M. CHAUSSIDON de ses précieuses directives, de même que des déterminations de surface et des diagrammes de RX qu'il a bien voulu effectuer.

Reçu pour publication en décembre 1962

SUMMARY

THE BALANCE OF EXCHANGEABLE CATIONS IN LEACHED SOILS

In a profile of a leached pseudogley, studied for reasons of illustration in the Citeaux forest, base saturation at pH 7 greatly increases from the A to the C horizon, while the pH is maintained at a rather constant value.

This divergence is unassociated with analytical techniques or the nature of clay. It is mainly explained by the presence of aluminium ; at the soil pH, the sum of the cations Ca, Mg, K, Na and Al actually equals the cation-exchange capacity. At pH 7, however, the degree of saturation is much lower in the surface horizons than in the deep layers. Here it should be considered that the exchange capacity is due to permanent charges and to charges that vary with the pH. The variable charges are much higher in the A horizon than in the C horizon, due to the higher level of organic matter.

ZUSAMMENFASSUNG

BILANZ DER AUSTAUSCHBAREN KATIONEN IN AUSGELAUGTEN BÖDEN

Auf einem aus dem Walde von Citeaux genommenen Beispiels eines Profils ausgewaschenen Bodens mit Pseudogley nimmt der Sättigungsgrad in Basen mit pH-7 vom Horizont A zum Horizont C stark zu, während der pH-Wert fast konstant bleibt.

Diese Verschiedenheit ist nicht an analytische Techniken, noch an die Art des Tones gebunden. Zu Erklärung muss man zu allererst das Aluminium in Betracht ziehen ; in der Tat ist die Summe der Ca-, Mg-, K-, Na- und Al-Kationen fast dem Kationenaustauschvermögen gleich. Bei einem pH-7 ist der Sättigungsgrad in den oberen Horizonten viel schwächer als in den tiefen Schichten. Es muss daher in Betracht gezogen werden, dass das Austauschvermögen fortwährenden und mit dem pH sich verändernde Ladungen zuzuschreiben ist. Die veränderlichen Ladungen sind im Horizont A höher als im Horizont C, bedingt durch eine grössere Menge organischer Masse.

РЕЗЮМЕ

Баланс обменных катионов в выщелоченных почвах.

Е. ЛЕФЕВР-ДРУЭ и С. МЭРИО (Дижон).

В профиле, взятой в качестве примера в лесах Сито, выщелоченной и содержащей псевдо-глей, почвы, при более или менее постоянном pH-7, степень насыщенности щелочами сильно увеличивается от горизонта А до горизонта С.

Виною этого расхождения не являются ни технические приемы анализов, ни природа глины. Чтобы его об' яснить необходимо в первую очередь учесть роль аллюминия : и действительно, при определенном pH, сумма катионов Ca, Mg, K, Na et Ae более или менее соответствует обменной способности почвы. Но при pH-7 степень насыщенности поверхностных горизонтов более слаба чем в глубинных слоях. В этом случае надо принимать во внимание тот факт, что обменная способность вызывается как постоянными, так и переменными в зависимости от pH, зарядами. В горизонте А переменные заряды крупнее чем в горизонте С в виду важной роли которую играет органическое вещество почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARSHAD I., 1951. Cation exchange in soils. I Ammonium fixation and its relation to K fixation and to determination of ammonium exchange capacity. *Soil. Sci.*, **72**, 361-371.

BARSHAD I., 1954. Cation exchange in micaceous minerals. Replaceability of the interlayer cations of vermiculite with ammonium and potassium ions. *Soil. Sci.*, **77**, 463-472.

BEL B., MATHIEU G., DENIZOT H., 1952. Étude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon. *Ann. agron.*, 191-206.

BLANCHET R., PERIGAUD S., CHAUMONT C., NADEAU J. C., 1960. Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols. *Ann. agron.*, **6**, 621-649.

BLANCHET R., NADEAU J. C., CHAUMONT C., PERIGAUD S., 1960. Apparition d'aluminium échangeable au cours de l'acidification d'un sol. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1415-1417.

CHARLOT G., BEZIER D., 1949. *Méthodes modernes d'analyse quantitative minérale*, 289-296.

COLEMAN N. T., WEED S. B., MC CRACKEN R. J., 1959. Cation exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont soils of North Carolina. *Soil Sci. Soc. Amer Proc.*, **23**, 146-149.

DHARIWAL A. P. S., STEVENSON D. J., 1958. Determination of fixed ammonium in soils. *Soil. Sci.*, **86**, 343-349.

DECKERS J., VANSTALLEN R., 1955. Contribution à l'étude de la saturation en bases des sols bruns de l'Ardenne et la Famenne. *Agricultura*, **3**, 311-340.

GASTUCHE M. C., 1957. L'aluminium libre en surface de la kaolinite. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **9**, 49-59.

GILLY G., 1958. Acidité et aluminium échangeable. *Ann. agron.*, **9**, 677-689.

GOUNY P., MERIAUX S., GROSMAN R., 1960. Importance de l'ion ammonium à l'état non échangeable dans un profil de sol. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1418-1420.

BARROWS H. L., DROSDOFF M., 1958. A comparaison of methods for determining the base exchange capacity of some soils of the lower coastal plain of the Sousthestern United States. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 119-121.

LAUDELOUT H., ECKMANN J. P., 1958. La stabilité chimique des suspensions d'argile saturée par l'ion hydrogène. *Trans. Int. Soc. Soil. Sci., II, IV*, Comm. 2, 194-199.

LEFEBVRE P., 1961. Contribution à l'étude de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols non calcaires. *Ann. agron.*, **12**, 169-200.

LEFEBVRE P., LEFEBVRE G., 1961. Observations sur la valeur de la capacité d'échange et des cations échangeables de quelques sols picards non calcaires. *Bull. A. F. E. S.*, **8**, 177-196.

MC LEAN E. O., HEDDLESON M. R., BARTLETT R. J., HOLOWAYCHUK N., 1958. Aluminium in soils. I Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 382-387.

MÉHLICH A., 1948. Determination of cation and anion exchange properties of soils. *Soil Sci.*, **66**, 429-445.

MÉRIAUX S., GILLY G., LAMONTRE B., 1957. Sur le lessivage des sols de la Plaine de la Saône. *Bull. A. F. E. S* **83**, 715-727.

MÉRIAUX S., GILLY G., 1958. Considérations pédologiques et agronomiques sur le Val de Saône. *Ann. agron.*, **9**, 593-636.

MÉRIAUX S., GOUNY P., GROSMAN R., 1960. Sur le degré d'évolution des sols de la plaine de la Saône. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 1312-1313.

PRATT P. F., BAIR F. L., 1961. A comparaison of 3 reagents for the extraction of aluminium from soils. *Soil Sci.*, **91**, 357-359.

PRATT P. F., 1961. Effect of pH on the cation exchange capacity of surface soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 96-98.

RUSSEL E. J., 1950. *Soil conditions and plant growth.*

SAWHNEY B. L., JACKSON M. L., COREY R. B., 1959. Cation exchange capacity determination of soils as influenced by the cation species. *Soil Sci.*, **87**, 243-247.

TCHERNOV V. A., 1956. De la nature de l'acidité du sol. *C. R. 6e Congr. Int. Sci. Sol., Paris, B*, 547-555.

YUAN T. L., FISKELL J. G. A., 1959. Aluminium studies. II. The extraction of aluminium from some Folrida soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 202-205.

YUAN T. L., 1959. Determination of exchangeable H in soils by a titration method. *Soil Sci.*, **88**, 164-167.

Ann. agron., 1963, **14** (3), 261-377.

631. 615 (44)

CONTRIBUTION AGRONOMIQUE A LA MISE EN VALEUR DE LA BRENNE (SOLS HYDROMORPHES) (1)

(SUITE)

Simone PÉRIGAUD (2)

Station agronomique, Châteauroux (Indre)

TROISIÈME PARTIE

LE COMPORTEMENT DES SOLS DE BRENNE. CONSÉQUENCES SUR LES PROBLÈMES DE PHYSIQUES DU SOL EN SOL HÉTÉROGÈNE ET HYDROMORPHE.

I. — PRINCIPES. DÉFINITIONS ET MÉTHODES

A. — Principes

Si une présentation pédologique d'ensemble était nécessaire pour « situer » la Brenne, les études menées avec l'optique de mise en valeur agricole nous ont amené à nous attacher particulièrement au comportement des sols que l'on voulait assainir par drainage. C'est sur eux qu'il convenait de déterminer la valeur des analyses classiques et la mise au point éventuelle de tests nouveaux ; en l'absence de normes définies, l'observation du terrain lui-même et sa réponse aux conditions climatiques variées d'une année et de plusieurs cycles annuels constituaient ici encore plus qu'ailleurs la base d'interprétation des méthodes de laboratoire.

C'est donc sur les parcelles des Associations Syndicales de Drainage qu'ont porté nos efforts, dans l'ordre schématique suivant : l'étude préalable sommaire par sondages permet de caractériser le type de sol ; l'examen détaillé des tranchées au cours des travaux de pose des drains précise les données sur l'hétérogénéité du sol. La véritable étude de comportement commence ensuite, dès la mise en culture et se poursuit sur plusieurs années.

(1) Le début de ce mémoire a paru dans les Annales Agronomiques, 1963, *14*, n° 2, p. 121.
(2) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Massif Central, Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

Cette étude est menée dans le cadre d'une expérimentation culturale de longue durée qui doit permettre de déterminer les capacités de production des sols de Brenne drainés. Cette expérimentation qui met en comparaison des modes d'exploitation différents et teste des « interventions culturales » complémentaires du drainage doit finalement fournir les données de base nécessaires à l'établissement du projet final de mise en valeur dans son contexte technico-économique.

Cet aspect de nos activités n'est pas traité ici (consulter par ailleurs S. PERIGAUD [1]). Il convient simplement de se rappeler que les études de comportement sont possibles et valables dans le cadre d'une expérimentation en place nous permettant toutes les interventions jugées utiles dans des conditions culturales parfaitement définies.

De même, bien qu'il s'agisse ici surtout d'une étude de « comportement physique » du sol, l'interférence avec les problèmes chimiques et biochimiques ne peut être négligée. De ce dernier aspect, abordé dans son ensemble par ailleurs (consulter R. BLANCHET et S. PERIGAUD [2] ; S. PERIGAUD [3]) nous ne conservons ici que quelques éléments indispensables à une meilleure compréhension des problèmes physiques.

Les parcelles étudiées comprennent à peu près tous les « types » de sols qui ont été décrits dans la IIe partie de cette étude. Mais on s'attache moins ici au « type granulométrique » et beaucoup plus au « type hydrique ». C'est la raison pour laquelle les descriptions de profils seront au besoin reprises et précisées pour chaque cas particulier étudié.

Après un rappel préliminaire de quelques définitions et formules de base nécessaires à la compréhension ultérieure du texte, un premier chapitre est consacré aux méthodes utilisées. Les différents types de sols sont ensuite étudiés en détail sous l'aspect fondamental de leur comportement vis-à-vis de l'eau. Quelques pages évoquent brièvement le problème de l'azote, commun à tous les sols de Brenne. Une synthèse de tous les résultats est ensuite présentée au niveau régional. Dans un dernier chapitre, le cas particulier des sols hydromorphes et de structure instable à l'eau est abordé sous l'angle général des problèmes de Physique du Sol.

B. — Rappel de définitions

1° *Le potentiel capillaire* est l'abaissement d'énergie libre que subit 1 g d'eau fixé par le sol par rapport à 1 g d'eau libre. C'est, autrement dit, l'énergie de rétention de l'eau par le sol que l'on exprime en centimètres d'eau ou en atmosphères. Nulle quand le sol est saturé, cette force de rétention augmente au fur et à mesure que le sol se déssèche. Comme ψ atteint des valeurs très élevées aux faibles humidités, on utilise la notation pF, qui est le logarithme de ψ exprimé en cm d'eau.

Les courbes de pF traduisent, pour chaque sol, la relation pF f (H). Des phénomènes d'hystérésis font que ces courbes ne sont pas les mêmes suivant que l'échantillon est en cours de dessiccation ou de réhumectation.

(1) En cours de publication.
(2) En cours de publication.
(3) Consulter : C. R. Tr. St. Agr., 1959-1960-1961, Station de Châteauroux.

2° *Caractéristiques hydriques de sols* (constantes conventionnelles) :

— l'humidité équivalente est l'humidité du sol à $\psi = 1\,000$ g. cm ou pF 3. (centrifugation dans un champ de 1 000 g) : elle correspond sensiblement à la quantité d'eau retenue par le sol ressuyé.

— le point de flétrissement permanent est l'humidité du sol à $\psi = 16\,000$ g cm, soit pF 4,2. Elle correspond sensiblement à l'eau trop énergiquement retenue pour être utilisable par les plantes.

3° *La capacité au champ.* — C'est l'humidité d'un sol qui a été réhumecté et est bien ressuyé. Dans certains cas, comme on le verra plus loin, le ressuyage est lent, mal défini et le concept théorique de « capacité au champ » trouve difficilement une possibilité d'application. En conséquence, il faudra entendre par capacité au champ, dans les pages qui vont suivre, l'humidité maxima à laquelle le sol se maintient systématiquement après des périodes non pluvieuses et de faible évapotranspiration, ceci en l'absence de tout obstacle extérieur à l'écoulement de l'eau.

Autrement dit, les « capacités au champ » sont ici les humidités du sol total (y compris les graviers) observées en janvier, février, mars, après des périodes de 8 à 10 jours sans pluie.

4° *Les réserves hydriques utilisées* sont les quantités d'eau non libre retenues par le sol lui-même et « utilisées » par l'évapotranspiration du complexe sol-végétation.

Elles sont évaluées d'après les humidités extrêmes du sol en place et l'examen du profil. Dans chaque horizon, ces réserves utilisées r, exprimées en millimètres d'eau, se déduisent de l'équation suivante :

$$r^{mm} = (H_c - H_m)\,\sigma\,h$$

où H_c = capacité au champ, précédemment définie, exprimée en g d'eau retenus par 100 g de terre sèche (à 105°).

H_m = humidité minima observée sur le sol en place,

σ = densité apparente (masse de terre sèche y compris les cailloux, dans l'unité de volume du sol en place),

h = épaisseur (en décimètres) de l'horizon dont l'humidité a varié de H_p à H_m.

Pour tout le profil, la réserve hydrique utilisée R est la somme des réserves partielles de chaque horizon :

$$R^{mm} = \Sigma r$$

5° *Les réserves hydriques utilisables* sont les quantités totales d'eau normalement accessibles aux plantes (HALLAIRE, 1958). Elles se déduisent de l'équation suivante :

$$R^{mm} = (H_c - H_p)\,\sigma\,h$$

où H_p est ici l'humidité au point de flétrissement permanent : elle est égale ou inférieure à H_m (l'humidité minima observée dans le sol en place).

6) *La porosité totale P* est le volume des vides du sol (eau + air) exprimé en pourcentage du volume total (eau + air + terre). Elle se déduit de la densité apparente σ du sol en place et de la densité réelle d des éléments terreux.

$$P = \frac{d - \sigma}{d} \times 100$$

7) *La microporosité* est le volume des vides occupés par l'eau fixée par le sol par opposition à la *macroporosité,* volume des vides occupés par l'air ou l'eau libre La limite entre l'eau retenue et l'eau libre correspond par définition à l'humidité du sol en place réhumecté et ressuyé, autrement dit à la capacité au champ.

C'est le rapport entre microporosité et macroporosité qui définit l'importance de la phase gazeuse, à la capacité au champ, sans préjuger d'ailleurs de sa composition.

Pratiquement, dans les pages qui vont suivre, c'est la capacité au champ précédemment définie qui est utilisée pour le calcul de la microporosité. La densité de l'eau est prise égale à 1, même pour la fraction très fortement retenue par les colloïdes, d'où une légère erreur par excès dans les horizons très argileux, mais sans répercussion sensible sur le rapport micro/macro-porosité :

microporosité $mp = H_p\,\sigma$
macroporosité $Mp = P - mp$

8) *Les limites d'Atterberg* sont les humidités extrêmes à l'intérieur desquelles le sol est à l'état plastique, apte à se déformer et à rester déformé ;

— à la limite supérieure, ou *limite de liquidité* LL, les particules de sol, imbibées d'eau, commencent à se déplacer sous l'effet d'un choc,

— à la *limite inférieure de plasticité* ou LI, la masse devient rigide et se rompt, l'intervalle entre ces deux limites est l'*indice de plasticité* IP : IP = LL — LI.

Cet indice augmente avec la teneur en colloïdes et dépend de leur nature.

La limite d'adhésivité correspond au taux d'humidité nécessaire pour qu'il y ait adhérence, elle se situe entre LL et LI : la connaissance de ces 2 points par rapport à l'humidité du sol en place et à la courbe de pF est donc une bonne indication des possibilités de travail du sol.

C. — Les méthodes d'études

Ce sont essentiellement, comme on vient de le préciser, des méthodes de terrain, complétées par quelques analyses de laboratoire.

I. — Sur le terrain

a) *Des profils hydriques* ont été suivis tant en réhumectation qu'en dessiccation par des carottages répétés au milieu de l'année 1959-60, complétés par une nouvelle série de sondages vers la fin de l'été 1961. L'hétérogénéité extrême de ces sols était un obstacle majeur et nous a obligé à adopter une technique un peu particulière : à chaque endroit étudié, un profil-type a été retenu et les sondages ne sont gardés que s'ils répondent à ce type ; des mesures systématiques préalables et répétées ont d'ailleurs précisé les limites des variations. Les prélèvements pour mesures de l'humidité sont doublés de prélèvements pour éventuelle analyse mécanique ultérieure, exécutée en cas de résultats difficiles à interpréter. Dans ces conditions, 15 secteurs d'étude ont pu être gardés, les autres rejetés parce que trop hétérogènes. Quant aux profils conservés,

il ne faut en retenir que des ordres de grandeur ; mais ils sont caractéristiques en soi de la circulation de l'eau dans ces sols de Brenne.

Les mesures en place sont faites chaque fois sur les différents horizons et, pour un même horizon, sur les 2 ou 3 « tranches » correspondant à des degrés d'humidité visiblement différents. Les quelques premiers centimètres de surface n'ont toutefois

Commune : Propriétaire
Parcelle :

N° du profil

Date :
(par rapport à la culture) Lieu :
(— à la pluviométrie) Topographie :

Précédents	Année	Culture	Fumure N P K	Fumier	Rendement	*Travail du sol* (avec dates)
	196.					196.
	196.					196.
Année en cours ..	196.					196.

Profondeur	Texture couleur et matière organique	Humidité	Structure	Gley et concrétions	Vers	Enracinement	Observations
0							
10							
20							
30							
40							
50							
60							
70							
80							
90							
100							

Fiche de profil cultural
(recto)

pas été séparés de la totalité de l'horizon humifié, sauf dans les cas extrêmes d'engorgement superficiel ou de dessiccation très poussée.

b) *L'examen de l'état du terrain* et, en période hivernale, de l'écoulement des drains au collecteur est mené parallèlement. Il convient d'ailleurs de tenir compte, avant toute interprétation, de la variabilité éventuelle des types de sols appartenant à un même réseau de drains.

	Profondeur			
Analyse physique				
Humidité				
Densité apparente				
Densité réelle				
Porosité				
Analyse mécanique en %				
Terre fine				
Argile				
Limon				
Sable très fin				
Sable fin				
Sable grossier				
Calcaire				
Instabilité structurale (méthode HÉNIN)				
% agrégats — eau				
% agrégats — alcool				
% agrégats — benzène				
Indice S				
Indice K (perméabilité)				
Analyse chimiqne				
pH				
Matière organique % (1)				
Azote %				
C/N				
Eléments fertilisants				
K (BM. NH_4 (2)				
K (solution du sol) (3)				
P (solution du sol) (3)				

(1) Matière organique et carbone : méthode ANNE.
(2) K (BM. NH_4) : K mg/l — extrait BARBIER-MORGAN à l'acétate d'NH_4 (rapport sol/solution du sol = 1/2).
(3) P et K (solution du sol) : P et K mg/l — solution $CaCl_2$ N/100 (rapport sol/solution du sol = 1/4).

Fiche de profil cultural
(verso)

c) *Des profils culturaux* sont étudiés systématiquement, selon les normes préciseés dans « le profil cultural » (HÉNIN S., 1960) ; ils font l'objet de « fiches » descriptives adaptées à nos conditions de travail particulières (voir modèle ci-contre). Des examens sommaires de l'enracinement et des niveaux de circulation d'eau libre sont répétés au cours de l'année. Ils sont complétés par des examens détaillés après enlèvement des récoltes.

Sur la même fosse, des mesures de *densité apparente* sont exécutées avec un emporte-pièce, anneau biseauté dans le bas, d'un diamètre d'attaque très légèrement inférieur au corps du cylindre (modèle dérivé de celui de G. BRYSSINE, 1953). Cette technique n'est utilisable qu'en l'absence de cailloux et dans des sols ayant un minimum de cohésion.

d) *Perméabilité.* — Bien qu'il s'agisse d'études préalables à un assainissement, aucune mesure de perméabilité du sol en place n'a été faite ; la description des profils suffit à mettre en évidence qu'aucune des mesures habituelles n'est applicable ici : qu'il s'agisse de Vergière (BOURRIER J., 1954) du trou de tarière (X. 1959) ou même du flacon de Muntz (DEMOLON, 1952), on se heurte en Brenne à une hétérogénéité extrême du terrain, à la présence systématique d'anciennes racines et surtout, comme on le verra plus loin, à une incertitude théorique sur l'applicabilité des mouvements d'eau en sol saturé dans ces types de sols.

II. — MESURES AU LABORATOIRE

a) *Tests d'instabilité structurale* (HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958) sur les échantillons prélevés dans les fosses dans les conditions requises, séchés à l'air et passés sur tamis à maille carrée. Les taux d'agrégats stables après les 3 prétraitements (air, alcool, benzène) sont déterminés avec l'appareil de tamisage normalisé (FEODOROFF A., 1958). L'agitation qui précède le tamisage est manuelle et a été préalablement étalonnée sur les résultats obtenus par l'auteur de la méthode.

Rappelons que l'indice S se déduit de la formule suivante :

$$S = \frac{(A + L)\ \text{max.}}{\dfrac{\Sigma\ \text{agrégats}}{3} - 0{,}9\ Sg}$$

où (A + L) max. est le taux d'argile + limon obtenu par le traitement le plus dispersant (généralement benzène),

Sg = taux de sables grossiers (> 200 μ),

$\dfrac{\Sigma\ \text{agrégats}}{3}$ = moyenne des taux d'agrégats obtenus par les 3 prétraitements.

Le test de perméabilité correspond à une percolation en tube calibré (32 mm) sous une charge constante. Le coefficient K s'obtient par le calcul suivant :

$$K^{cm/h} = \frac{eV}{HS}$$

où e = hauteur de la colonne de terre,

V = volume d'eau recueilli au cours de la *première heure* de percolation,

H = charge d'eau (hauteur entre la surface libre de l'eau et de la base la colonne),

S = section de la colonne de terre.

b) *Autres mesures physiques* portant sur l'échantillon séché, mais passé au tamis ordinaire de 2 mm à maille ronde :

— *densité réelle* au picnomètre (PELTIER R., 1955),

— *capacité de rétention* : méthode dérivée du Bouyoucos = succion mais sous dépression contrôlée,

— *humidités aux différents potentiels capillaires* : mesures par pression (échantillon en cours de desséchement)(1)

— *analyses granulométriques* avec matière organique et pH (voir II partie de cette étude),

— *limites d'Atterberg et indice de plasticité* :

— la limite supérieure est obtenue par malaxage de l'échantillon avec la quantité d'eau suffisante pour obtenir la refermeture partielle d'un sillon tracé dans la masse, lorsqu'on applique 25 « coups » de force déterminée à la coupelle qui le contient ; cette opération se fait mécaniquement avec l'appareil de CASAGRANDE dans des conditions standard bien définies (PELTIER R., 1955) ;

— La limite inférieure de plasticité est obtenue par desséchement progressif de l'échantillon précédent, malaxé et enroulé jusqu'à obtenir des cylindres de 3 mm de diamètre prêts à se fragmenter : cette limite est plus difficile à obtenir de façon reproductible.

c) *Analyses chimiques*. Comme on l'a précisé précédemment, le détail des études menées sous cet aspect est traité par ailleurs. On ne trouvera ici que les données essentielles caractérisant le niveau chimique au départ de l'expérimentation ; elles comprennent les chiffres suivants (étalonnés sur des résultats de cultures en pots et d'essais antérieurs).

K. 2 chiffres :

— K échangeable en K mg/kg de terre.

— test BARBIER-MORGAN amélioré (BLANCHET R., PERIGAUD S., 1960). dans lequel la soude est remplacée par l'ammoniaque ; le résultat est exprimé en K mg/litre d'extrait. Statistiquement on peut admettre qu'un sol ne réagit plus aux engrais lorsque la concentration en K de cet extrait atteint 45 mg/litre.

P. 2 tests :

— appréciation du pouvoir de rétention du sol vis-à-vis de l'ion PO_4. Les différentes mesures nécessaires ne sont pas précisées ici, seul le résultat final est indiqué par un terme qualificatif : faible, moyen, fort ou très fort pouvoir adsorbant.

— solution du sol, P mg/litre, extrait au $CaCl_2N/100$ dans le rapport sol/solution = 1/4 (BLANCHET R., 1959).

Pour ne pas avoir à revenir par la suite sur ce problème chimique, les possibilités d'enrichissement du profil seront précisées pour chaque type de sol d'après les résultats obtenus par ailleurs.

N. *Azote minéral*, à différents niveaux du profil dans ses variations au cours de l'année (DROUINEAU G., GOUNY P., 1947). Le dosage est fait directement sur la terre humide.

— *Azote minéralisable*. Les échantillons sont ici préalablement séchés à l'air,

(1) Mesures faites par la Station centrale de Bioclimatologie (HALLAIRE M.)

mélangés à du sable, humidifiés et maintenus pendant 1 mois à l'étuve à 28° dans les conditions précisées par les auteurs de la méthode (DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1949).

— *tests sur les végétaux*. réactif à la diphénylamine sulfurique sur les tiges finement coupées (LECOMPT, 1959).

II. — ÉTUDE DE DÉTAIL DES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

Avant de détailler les profils hydriques obtenus sur les différents types de sols, il convient de replacer les observations et mesures dans le contexte de l'année étudiée.

A. — Le climat des années 1959-60-61

Les premières mesures ont été effectuées le 20 novembre 1959. Elles faisaient suite à un été particulièrement sec à la fin duquel le déficit théorique s'élevait sensiblement à 400 mm (d'après la formule de THORNTHWAITE), soit près du double de celui de l'année dit normale. Entre le 1er octobre et les premiers carottages, les pluies avaient rapporté 100 mm c'est-à-dire reconstitué les déficits réels des sols les plus secs.

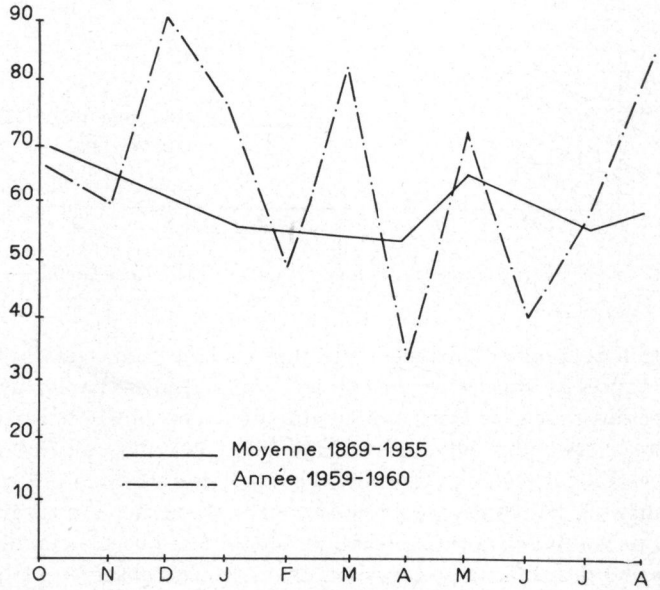


FIG. 22. — *Pluviométrie mensuelle*

La pluviométrie de l'année 1959-60 est traduite sur la figure 22 et le déficit théorique d'évapotranspiration sur la figure 23 : l'année considérée est caractérisée par des mois d'hiver, décembre, janvier et mars, particulièrement pluvieux, des mois

de printemps, avril et juin très secs et un mois d'août anormalement humide. Les périodes de sécheresse prolongées ont en fait couvert 3 périodes :

— du 19 avril au 12 mai,
— du 25 mai au 5 juin,
— du 13 au 22 juin,

et les déficits d'évapotranspiration sont un peu supérieurs à la normale jusqu'à fin juillet. A partir d'août, l'été pluvieux ralentit rapidement les pertes habituelles et les réserves se reconstituent dès septembre.

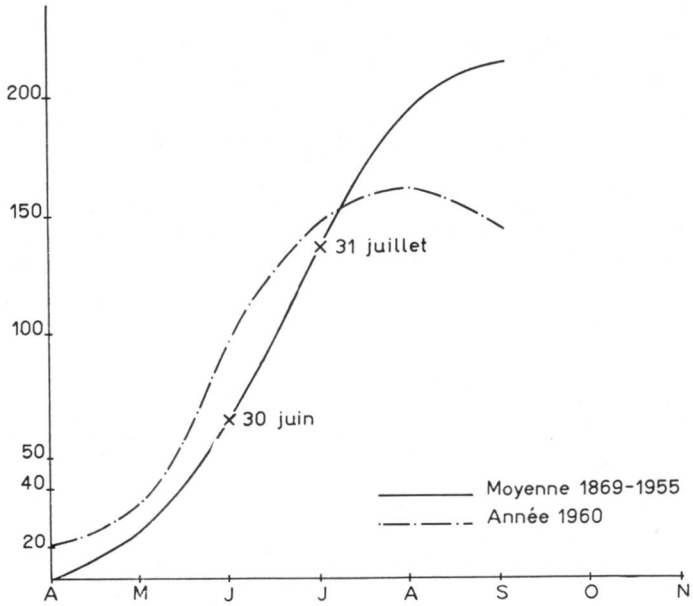


FIG. 23. — *Déficit théorique d'évapotranspiration — ETP Thornthwaite*) — P

L'observation des profils hydriques cette année a donc permis de suivre la réhumectation des sols après un été très sec, de voir leur comportement par un hiver pluvieux et de tester leur desséchement dans des conditions à peu près « normales » jusqu'au milieu de l'été, c'est-à-dire moyennement valables pour des cultures d'hiver et de printemps (blé d'hiver, céréales de printemps, pommes de terre précoces, premières coupes de fourrage). Par contre, la fin de l'été, très pluvieuse, n'a pas été « normale ; » elle a permis de comparer la réhumectation des profils sous des conditions d'évapotranspiration et à des stades végétatifs différents de ceux observés à l'automne.

Pour compléter l'étude du desséchement, quelques mesures ont été refaites un an plus tard, fin août 1961, à un moment où le déficit théorique atteignait 215 mm, valeur maxima de la « moyenne ». Mais comme on le verra plus loin, la différence observée sur les sols entre les deux années n'est pas uniquement à imputer aux différences climatiques.

B. — Les différents types de sols

Dans les pages qui viennent nous précisons pour chaque sol étudié :
— les caractéristiques essentielles du profil, présentées sous forme de tableau,
— le profil hydrique, avec :
— les conditions de réhumectation et de dessiccation,
— la capacité au champ et les réserves utilisées,
— Les courbes de pF correspondantes et les réserves théoriquement utilisables.
— le profil cultural,
— l'interprétation des caractéristiques physiques et chimiques par les données des observations précédentes,
— les tests d'instabilité,
— les différentes expressions de la porosité,
— les limites d'Atterberg,
— le niveau chimique,
— une conclusion sur la valeur du sol sous l'optique de ses possibilités d'aménagement.

On trouvera en annexe les Coordonnées Lambert des différents points présentés ici en détail et leur emplacement approximatif sur la dernière carte de Brenne (fig 41).

1° Les sols peu profonds sur grès

Il s'agit des sols où le grès se rencontre entre — 20 et — 70 cm, surmonté de sables plus ou moins grossiers avec ou sans intermédiaire de poches d'argile (exemple de la Poupetterie cité p. 157). Ici le facteur limitant est le grès avec ses conséquences d'une part sur le coût des travaux de drainage, d'autre part sur la faible épaisseur de sol.

L'irrégularité des affleurements de grès et la présence de poches d'argile rendent illusoire tout essai de mesure par profil hydrique. Il est d'ailleurs évident que ces sols ennoyés l'hiver par des séries de petites nappes perchées retenues par la variabilité du niveau imperméable, sont extrêmement secs l'été, incapables de retenir l'eau dans des sables grossiers et peu épais.

Deux profils culturaux sont comparés, l'un situé sur un sommet, l'autre dans dans un bas de pente.

a) *Premier profil.*

Le premier profil, sur un point haut, se présente de la façon suivante :

de 0 *à* 20, horizon humifié avec enracinement abondant (vieux pacage) mais des traces de rouille (gley) sur les racines,

de 20 *à* 30, horizon de même texture mais blanchi, structure faiblement cimentée ; peu de racines, localisées de préférence dans les trous de vers. Niveau d'engorgement de l'eau,

de 30 *à* 40, argile sableuse « marmorisée » très grossièrement structurée, présence de quelques grosses racines brunes d'ancienne brande, localisées autour des mottes. On peut remarquer ici l'extrême compacité de l'argile liée à la nature essentiellement kaolinique à faible pouvoir de gonflement. Ces poches d'argile sont en conséquence très peu exploitées par les racines.

à 40, grès compact.

Les différents résultats d'analyse sont reportés dans le tableau 9, ci-dessous.

TABLEAU 9

La Poupetterie. Caractéristiques du profil (sommet)

Profondeur	0-20	20-30	30-40
Analyse granulométrique			
Terre fine %	80	84	81
Argile %	5,6	5,0	27,0
Limons + sables très fins %	15	11	15
Sables fins %	14	15	16
Sables grossiers %	67	70	43
Matières organiques %	0,95	0,34	0,51
pH	6	5,7	5,7
Densité apparente		1,57	1,76
Densité réelle		2,61	2,66
Porosité		40,2	33,8
Tests d'instabilité			
AgO % (1)	74,8	81,4	53,6
AgB % (2)	70,7	80	52,3
AgA % (3)	73,7	81,4	59,6
Indice S	0,54	0,66	1,4
Indice K	3,3	1,33	0,60
Niveau chimique			
K échangeable	0,02		
K (B. M.) (4)	11	9	11
P solution du sol mg/lit	0,07	0,04	0,16

(1) AgO sans prétraitement.
(2) AgB prétraitement benzène.
(3) AgA prétraitement alcool.
(4) K (MORGAN-BARBIER modifié).

Le sol est peu épais, très sableux jusqu'à 30 cm, assez filtrant, chimiquement très pauvre, mais relativement facile à enrichir aussi bien en P qu'en K.

b) Deuxième profil : (bas de pente)

L'autre profil est plus profond (70 cm de sol au-dessus du grès) et un peu plus argileux parce que plus bas (9 p. 100 d'argile), il présente pratiquement les mêmes caractéristiques que le précédent : un horizon blanchi avec présence de nodules de fer, assez compact, et assez peu exploité au-dessus de l'argile à 45 cm ; le test K est du même ordre de grandeur, l'indice S un peu plus élevé :

	S	K
Horizon blanchi	1,3	1,8
Argile sous sol	2,4	0,6

Nous reviendrons par la suite sur la valeur des tests dans les sols grossiers : notons simplement ici dès maintenant l'intérêt de la comparaison entre 2 positions sur le terrain d'un même type de sol différenciées entre elles par l'importance

de l'ennoyage temporaire ; le 2e profil de la Poupetterie, situé dans un fond et en conséquence plus longuement ennoyé que le 1er sur un sommet, présente un horizon plus blanchi et plus cimenté : la nuance se traduit de façon plus nette sur S que sur K.

c) *Conclusion*

Les travaux de drainage sont coûteux dans ces sols où le drain est souvent posé dans la roche dure à miner, mais ils sont techniquement efficaces dans la lutte contre l'excès d'eau d'hiver. En revanche les sols sur grès sont des sols secs l'été, sans espoir d'amélioration par approfondissement racinaire.

2°) Les sols de sables alluvionnaires grossiers et profonds

L'exemple choisi est celui de la Biénaise au sud du bourg de Mézières sur la plage d'alluvions qui a été signalée page 132. Comme on l'a vu page 186, il est possible d'y dépister une évolution podzolique avec formations très localisées d'alios au niveau des bancs caillouteux plus gros. Certaines plages sont saines, d'autres le sont moins : comme c'est le cas des dépôts d'alluvions, les lits de sédimentation successifs ne sont pas réguliers et certains niveaux sont plus caillouteux ou plus argileux que d'autres.

TABLEAU 10

La Biénaise. Sol de sable grossier profond

Profondeur	0-20	20-45	45-70	70-90
Analyse granulométrique				
Terre fine %	88	82	93	79
Argile %	6,0	4,0	9,0	17,0
Limons + sables très fins	10,0	9,5	7,2	10,0
Sables fins	12,0	10,0	8,5	8,0
Sables grossiers	70	76	75	65
Matière organique	1,4	0,57	0,27	0,38
pH	7,1	7,0	7,0	6,9
Densité apparente	1,41	1,55	1,59	
— réelle	2,60	2,60	2,58	
Porosité	46	40,5	38,5	
Tests d'instabilité				
AgO (1) %	77	75	76	
AgB (2) %	84,5	81,3	90,0	
AgA (3) %	88,2	86,5	89,5	
Indice S	0,69	0,4	0,5	
— K	10,2	35	47	
Niveau chimique				
K échangeable g/kg	0,10	0,11	0,08	
K (B. M.) (4)	35	35	5	21
P solution du sol mg/l.	1,03	0,15	0,04	

(1) AgO sans prétraitement.
(2) AgB prétraitement benzène.
(3) AgA prétraitement alcool.
(4) K (Morgan-Barbier modifié).

Malgré les difficultés des études de détail dans de tels sols, elles ont été poursuivies systématiquement ; mais elles doivent faire l'objet d'un examen minutieux de tous les résultats et d'une large interprétation.

Les analyses du profil-type retenu sont reportées sur le tableau 10 ci-dessus :

Pratiquement, il peut y avoir des bancs beaucoup plus caillouteux (50 p. 100 de terre fine seulement) et des bancs plus argileux (jusqu'à 18 p. 100 entre 30 et 45 cm) ; les deux côtés d'une même fosse ne sont pas toujours identiques.

Quelques observations s'imposent sur les mesures effectuées dans les fosses et les chiffres fournis dans le tableau d'analyse :

— les densités apparentes ne sont exactes qu'à 8 p. 100 près, la présence de cailloux gênant considérablement les prélèvements dans les cylindres calibrés,

— les tests d'instabilité sur des sols contenant parfois à peine 75 p. 100 de terre fine et plus de 70 p. 100 de sables grossiers ont encore moins de signification qu'à la Poupetterie. Sur ce type de sol, le test de perméabilité donne des valeurs échelonnées entre 4 et 47 cm /heure, directement liées à la teneur en argile et éléments grossiers.

a) *Le profil hydrique*

Le profil hydrique (figure 24) suivi sous trèfle incarnat semé mi-août et déjà vigoureux fin novembre, est un profil « schématique » de sol très hétérogène.

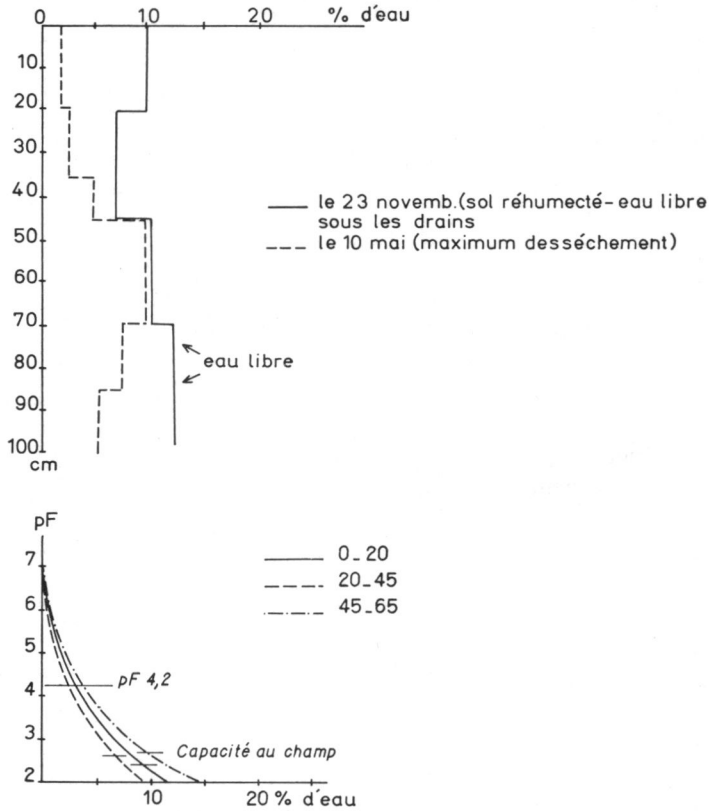


FIG. 24. — *La Biennaise : sol de sable grossier*

En haut : profil hydrique (sous trèfle incarnat — 1959-1960), *En bas* : courbe de pF.

— *La réhumectation* est très rapide. Pratiquement le collecteur avait commencé à couler dès mi-novembre et le profil du 23 correspond à celui qui restera valable pour tout l'hiver avec un décalage de 2 à 3 jours entre la fin d'une pluie et son évacuation par le réseau de drain.

— *La capacité au champ* peut donc être considérée comme l'humidité de ce profil ressuyé jusqu'à 60 cm c'est-à-dire 7 à 10 p. 100 d'eau suivant l'horizon; elle correspond sensiblement à une humidité de la terre fine comprise entre 8,5 et 10 p. 100 et un potentiel capillaire traduit par un pF voisin de 2,1 — 2,2 en surface, 2,4 ou 2,5 très en profondeur (tableau 11).

— *Le desséchement* s'est fait aussi rapidement que la réhumectation, accéléré par une végétation vigoureuse entièrement couvrante qui a montré des signes de faiblesse dès fin avril, au bout de 10 jours sans pluie. La production s'élevait à 4t 4 de M.S. à l'ha le 3 mai à l'apparition des premiers boutons floraux (fourrage à 84 p. 100 d'eau) mais le fourrage grillait sur pied entre 5 et 7 le mai. Le profil hydrique du 10 mai représente le point de desséchement maximum obtenu qui a dépassé, jusqu'à 35 cm le point de flétrissement permanent (fig. 24) tandis qu'au-dessous la réserve restait inexploitée (pF 2,8).

Par la suite, la transpiration a été faible (sol peu couvert, puis labouré en juin), le profil est resté identique à lui-même jusqu'en juillet : il n'y a pas eu desséchement plus poussé en profondeur.

— *Les réserves hydriques* utilisées par la végétation sont très faibles, inférieures à 40 mm puisque la participation des réserves, au-delà de 50 cm est insignifiante. Pratiquement, compte tenu de l'hétérogénéité qui entraîne des écarts de 35 p. 100 dans les humidités instantanées à un même niveau, on peut admettre que les réserves hydriques utilisées de ces sols dans les conditions actuelles, sont comprises entre 35 et 55 mm.

Comme on le voit sur la figure 23, ces réserves sont théoriquement épuisées en juin ; mais avec un volant aussi réduit il suffit d'une période de très forte évapotranspiration instantanée dès fin avril (8 mm par jour) pour les utiliser et une culture sensible à la sécheresse ou en pleine « période critique » n'y résiste pas.

b) *Le profil cultural*

L'examen du profil cultural met en évidence un enracinement très limité : il n'y a aucune pénétration radiculaire à travers l'alios situé vers — 25-30. Là où il n'y a pas d'alios, l'enracinement vigoureux du trèfle ne dépasse pas 40 à 50 cm. Les céréales ne réagissent pas beaucoup mieux et les orges de printemps « grillent » couramment. Seule la luzerne, et à un degré moindre le maïs, arrivent à s'implanter plus profondément.

L'importance limitée des réserves actuellement utilisées est évidemment liée à la faible capacité de rétention de ces sols très grossiers, mais elle est surtout due à une exploitation très réduite du sol par le système radiculaire peu profond. Les réserves utilisables pourraient dépasser 100 mm.

c) *Les analyses physiques*

Elles confirment les données de l'observation :

— les tests d'instabilité, malgré la variabilité des résultats obtenus, traduisent la grande perméabilité de ces sols qui supportent un drainage à très grand écartement ;

— la microporosité est faible dans ces sols graveleux à faible capacité de rétention et les pores libres importants : le rapport micro/macroporosité est bas (tableau II) ; la circulation de l'eau est normale et l'aération très convenable ; ce ne sont pas là les « facteurs limitants » de ces sols.

Aucune analyse physique par contre ne dépiste vraiment ce qui constitue le principal obstacle à l'enracinement : la compacité et le « bétonnage » presque systématique des bancs caillouteux aliotiques.

TABLEAU II

La Biénaise : quelques caractéristiques physiques

Profondeur	Capacité au champ	Humidité correspondante de la terre fine	pF correspondant	Microporosité	Macroporosité	Micro/macro porosité
0-20	9	10,2	2,1	13	33	0,4
20-45	7	8,5	2,2	11	29,5	0,4
45-70	10	10,7	2,5	15	23,5	0,65

Les limites de plasticité n'ont pas de signification dans de tels sols.

d) *Niveau chimique*

On est en présence d'un sol exceptionnellement bien entretenu pour la Brenne. La chute brutale de concentration de la solution du sol en acide phosphorique est liée d'une part à la forme insoluble de l'engrais utilisé (phosphate naturel sur sol neutre), d'autre part à la rétention énergique de l'ion PO_4 par les sables très ferrugineux. Autrement dit, si la couche superficielle est riche le sous-sol est très pauvre en acide phosphorique dès —20 cm ; l'enrichissement n'est pratiquement pas possible en profondeur à partir du seul drainage de P_2O_5.

Cette propriété vient s'ajouter à la compacité du sous-sol pour limiter l'enracinement et par conséquent rendre difficilement accessibles les réserves hydriques profondes.

e) *Conclusion*

Les sols de sables grossiers caillouteux alluvionnaires sont très perméables et sont facilement assainis par un réseau de drainage à grand écartement.

Ils sont aussi très secs ; leur granulométrie très grossière leur vaut une faible capacité de rétention et l'absence de toute remontée capillaire à partir de la nappe qui existe au niveau de la Claise 2 mètres plus bas. Ils présentent en outre un enracinement très limité, bloqué par la compacité élevée de bancs caillouteux infiltrés d'alios et un niveau phosphorique faible en profondeur.

3°) Sols de gravillons argileux

Ces sols se rencontrent en bordure de la Claise dans un secteur qui fait suite, vers le nord, au précédent et voit mêlées les mêmes alluvions — ici moins caillouteuses — à des éléments argileux arrachés du Cénamanien et du Turonien (voir page 132,

profil n° 20, figure 17) ; là encore on se trouve en zone particulièrement hétérogène.

Le tableau 12 ci-contre met en comparaison deux profils situés dans le même secteur étudié, le premier beaucoup plus sableux que le second.

Il existe bien entendu toutes les nuances de passage de l'un à l'autre, avec des taux de gravillons et d'argile très variables.

a) *Le profil hydrique*

Malgré la gageure que semblent présenter des mesures hydriques dans de telle conditions d'hétérogénéité, il a finalement été constaté que la variation d'humidité de la terre totale à un même niveau et à un instant donné ne dépassait jamais 20 p. 100 ; la plupart du temps elle se tient aux environs de 10-12 p. 100.

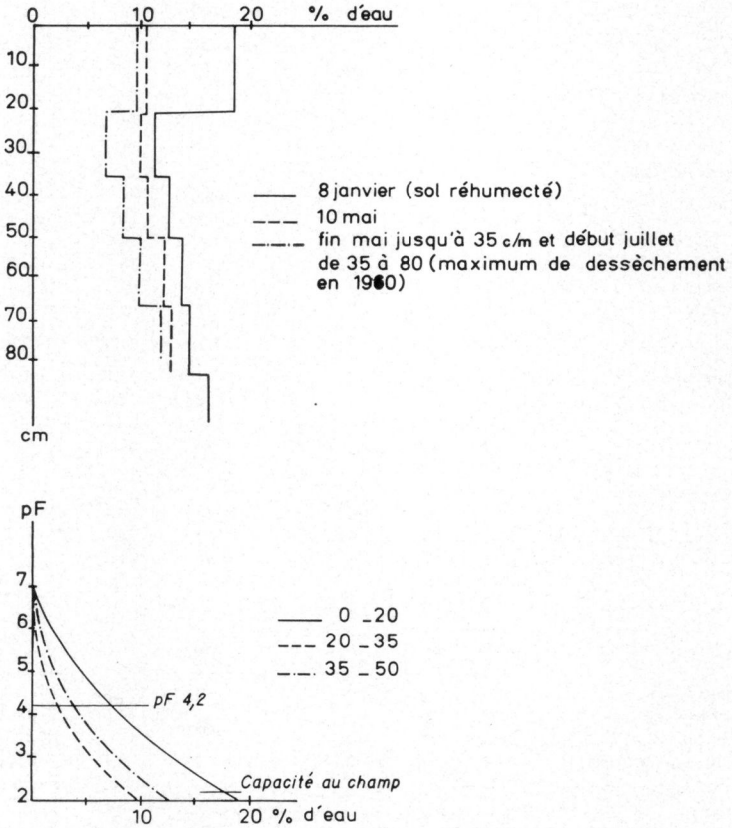


FIG. 25. — *La Prêle : sol un peu argileux et gravillonneux*
En haut : profil hydrique (sous blé — 1959-1960),
En bas : courbe de pF (terre fine).

Il est donc possible de tracer un profil hydrique « moyen » (figure 25) qui correspond ici à une culture de blé.

— La *réhumectation* s'est effectuée dans des conditions normales, le réseau de drainage a commencé à couler plus tard que dans le cas précédent, vers fin novembre.

A partir de ce moment, le profil s'est maintenu tout l'hiver avec un décalage de 4 à 5 jours entre les chutes de pluie et la cessation d'un écoulement sensible au collecteur.

— *La capacité au champ* correspond approximativement au profil du 8 janvier, de l'ordre de 18 p. 100 pour la couche superficielle labourée assez argileuse. Elle croît de 11 à 14 p. 100 en dessous dans les horizons gravillonneux. La courbe de pF (fig. 22) du profil le plus sableux (tableau 12) met en évidence que l'humidité du sol en place en profondeur est très supérieure à celle correspondant aux potentiels les plus bas mesurés (pF 2,2). Nous reviendrons sur ce point dans le dernier paragraphe consacré aux problèmes généraux de Physique du Sol.

TABLEAU 12

La Prêle. Caractéristiques de deux profils

profondeur :	Profil sableux				Profil argileux			
	0-20	20-35	35-50	50-70	0-20	20-35	35-60	60 80
Analyse granulométrique								
Terre fine %	84	72	62	91	88	85	65	99
Argile %	19	8,2	11,3	13	24,5	20,0	28,0	31
Limons + Sables très fins	9	5	1,5	9	14	16	4	13
Sables fins	11	4,5	3,5	5	12	15	5,5	21,5
Sables grossiers	59	83	84	73	46	47	61	33,5
Matière organique	2,6	1,7	0,4	0,3	3,0	2,1	0,6	
pH	7,5(*)	7,9(*)	7,8	7,4	7,8(*)	8,0(*)	7,9	7,9
Densité apparente					1,38	1,66	1,67	1,84
— réelle					2,58	2,64	2,65	2,70
Porosité					46,5	37	37	32
Tests d'instabilité								
AgO % (1)	80,5	84	82		74	76	75 à 82	45,6
AgB % (2)	71,5	81,5	74,5		71	74	70 à 77	29,7
AgA % (3)	82	87	79		78	81	77 à 85	59
Indice S	0,3	0,8	1,84		0,16	0,17	0,7 à 1,1	1,01
— K	43,00	36,0	16		30	38	10,8 à 8,1	2,4
Niveau chimique								
K échangeable g/kg	0,05				0,07	0,06	0,04	0,06
K-B.M.) (4)	28	11	9		16	12	13	11
P solution du sol en mg/l	0,29	0,18	0,08	0,02	0,25	0,11	0,04	

(*) = 2,5 à 3,5 % de calcaire grossier.

(1) AgO sans prétraitement (2) AgB prétraitement benzène

(3) AgA prétraitement alcool (4) K (MORGAN-BARBIER modifié)

— *Le desséchement* se fait moins rapidement que dans les sols de sables ; le profil du 10 mai — qui correspondait au flétrissement dans le cas précédent ne traduit pas ici le desséchement maximum. Le 20 mai ce desséchement est poussé jusqu'à 35 cm et début juillet jusqu'à 65 cm.

— *Les réserves hydriques* utilisées sont dans ces conditions, plus élevées, de l'ordre

de 80 à 100 mm, si l'on tient compte des écarts dus à l'hétérogénéité d'un point à un autre. En année moyenne (figure 23) et tout autre facteur de croissance mis à part, les céréales arrivent sensiblement à dépasser le stade de formation du grain avant d'avoir épuisé cette réserve. Le volant n'est toutefois pas suffisant pour éviter une « crise » au moment du gonflement comme cette année.

b) *Le profil cultural*

Le profil cultural permet de mettre en évidence deux niveaux d'exploitation très différents :

— les 25 à 30 premiers centimètres de sol assez argileux, calcaire, bien humifiés, sont remarquablement bien « structurés » pour la Brenne, bien exploités malgré une très légère compacité à la base,

— les horizons gravillonneux gras sous-jacents sont beaucoup moins exploités. Si l'eau y circule à peu près normalement sans engorgement prolongé, au-dessus du niveau des drains, la granulométrie grossière et argileuse y favorise la formation d'un « béton » extrêmement dur par desséchement. Le blé arrive à pénétrer mais les betteraves restent partiellement « posées » sur la couche gravillonneuse.

c) *Les analyses physiques*

— *Les tests d'instabilité* sont ici difficiles à interpréter dans les horizons grossiers très remaniés par l'élimination des graviers au cours de la préparation. Seuls les résultats des horizons superficiels sont très significatifs de l'excellente stabilité et parallèlement de la bonne perméabilité de ces sols calcaires. Quant aux horizons gravillonneux, il faut retenir des tests, sans chercher à rattacher leurs valeurs à celles des autres sols, qu'ils restent perméables et ne se colmatent pas par dispersion des argiles : effectivement ces sols « drainent bien » et les eaux de drainage sont limpides.

— *La porosité.* — Les horizons gravillonneux du sous-sol exploitable ont une porosité totale faible (37 p. 100) (tableau 13) ; comme on le constate sur le profil, le tassement commence ici à être un sérieux obstacle. La composante grossière maintient toutefois une macroporosité sensiblement égale à la porosité fine ; la structure étant d'autre part stable à l'eau, la circulation de l'eau et de l'air est à peu près normale après installation d'un réseau de drains.

TABLEAU 13

La Prêle. Caractéristiques physiques essentielles

Profondeur	Capacité au champ	Humidité correspondante de la terre fine	Microporosité	Macroporosité	$\frac{\text{Micro}}{\text{Macro}}$ por.	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité
0-20	18	21	25	21,5	1,1	31	20,4	10,6
20-35	11	15	18	19	1	29,4	12,9	16,3
35-50	13	21	21	16	1,3			
60-80	14	15	26	6	4			

— *Les limites de plasticité* (tableau 13) portent sur la « terre fine » et peuvent difficilement être extrapolées au sol « total », avec une correction systématique proportionnelle au taux de graviers ; la présence d'éléments grossiers change complètement les propriétés mécaniques du sol et une telle correction serait sans signification.

d) *Le niveau chimique*

Nous sommes ici dans les meilleurs sols de Brenne, par conséquent les mieux exploités ; les fumures apportées ont toujours été à peu près normales en acide phosphorique. En conséquence ;

— pour **P**, le sol, de pouvoir adsorbant relativement faible est assez riche. Le sous-sol gravillonneux par contre, plus adsorbant et peu pénétré, est beaucoup plus pauvre ;

— *pour* **K**, le niveau est plutôt faible en surface et très faible en profondeur.

On retrouve ici cette même « pauvreté » du sous-sol qui s'ajoute aux conditions physiques défectueuses (compacité) pour limiter l'enracinement et l'exploitabilité des réserves hydriques profondes.

e) *Conclusions*

Les sols « gravillonneux » et argileux de bordure de Claise sont caractérisés :

— par leur excellente stabilité structurale (tout au moins pour la région), et, par conséquent, une pleine efficacité d'un réseau de drainage ;

— par un sous-sol argileux grossier très compact qui limite l'enracinement et l'exploitabilité des réserves hydriques.

4° Les sols très argileux

Argiles vertes et argiles à silex du Turonien, nord de la Brenne.

Ces sols sont tout à fait en bordure de Brenne et appartiennent aux formations géologiques voisines du nord de la Claise (voir page 132). Ils sont été étudiés avec soin, car, très humides aussi, ils font partie du même bassin drainé par la Claise que toute la moitié nord de Brenne comprise entre l'anticlinal et cette rivière : ils entrent par conséquent dans le même projet d'aménagement de cet émissaire quand il s'agit de chercher à rentabiliser les travaux d'hydraulique générale. C'est en outre un type de comportement différent des autres sols.

L'exemple choisi est celui de La Roche dans la commune de Mézières-en-Brenne en bordure nord de la rivière.

Sous 20 à 40 cm d'un sol gravillonneux voisin du type précédent, en un peu plus argileux, on se heurte à l'argile plastique vert très pâle trouvée dans les fondations du château d'eau de Vendœuvres (voir Annexe I) et dont l'analyse totale a été fournie page 159. Les analyses granulométriques sont données sur la figure 18 (profil 615). Des inclusions de poches plus ou moins gravillonneuses s'intercalent par endroits de façon irrégulière, entre la couche arable et l'argile verte.

Le sol est donc très hétérogène entre 30 et 50 cm. Schématiquement le profil

se présente avec les caractéristiques précisées dans le tableau 14 ci-dessous. Seules les extrêmes sont indiquées pour l'horizon intermédiaire : à la limite c'est une argile verte encore sableuse qui affleure à — 30.

TABLEAU 14

La Roche. Caractéristiques des profils

Profondeur	0-20	20-30	30-50		50-100
			1er type	2e type	
Analyse granulométrique					
Terre fine %	86	86	60	96	100
Argile %	25	35	22	53	82
Limons + sables très fins	15	10	5	8	8
Sables fins	14	9	12	5	5
Sables grossiers	43	45	60	33	4
Matière organique	2,4				
pH	7,8 (*)	8,1 (*)	7,9 (*)	7,8 (**)	7,8 (**)
Densité apparente		1,52	1,60	1,27	1,22
— réelle		2,62	2,69	2,69	2,70
Porosité		41	39	52	55
Tests d'instabilité					
AgO % (1)	62	51		21,7	
AgB % (2)	49	19		5,0	
AgA % (3)	68	59,3		27,0	
Indice S	0,97	0,91		1,9	
— K	5,5	4,2		1,7	
Niveau chimique.					
K échangeable g/kg	0,13			0,18	0,24
K (B. M.) (4)	52	26	37	53	
P solution du sol en mg/litre	0,15	0,01	0,01	0,04	

(*) calcaire 1 à 3 %.
(1) AgO sans prétraitement.
(2) AgB prétraitement benzène.
(**) non calcaire.
(3) AgA prétraitement alcool.
(4) K (MORGAN-BARBIER modifié).

a) *Forme de la nappe entre drains*

Le type de sol se prêtant à une étude des variations de la nappe, des séries de petits puits ont été mis en place tous les mètres sur une ligne perpendiculaire aux drains dans un secteur plat. Ces puits étaient des trous de sonde dont les parois avaient été délissées au couteau avec soin ; la plasticité du sol était suffisante pour ne pas nécessiter une consolidation artificielle. Seuls quelques trous se sont effondrés à l'emplacement des veines les plus sableuses.

La variation du niveau de la nappe au cours de l'hiver 1958-1959 qui a suivi

le drainage est traduite sur la figure 26 où seules les dates caractéristiques ont été conservées :

— *le 28 novembre,* 3 jours après une pluie de 15 mm tombée en 4 jours, la nappe entre deux drains a sensiblement la forme d'une demi-ellipse, aux irrégularités près dues à l'hétérogénéité de la couche entre — 30 et 50 cm. Jusqu'à ce moment, le collecteur coule « normalement » ; le débit est lié à la date et à l'intensité des pluies (GUYON, 1961), maximum dans les 24 heures qui suivent, et progressivement annulé en cinq à sept jours.

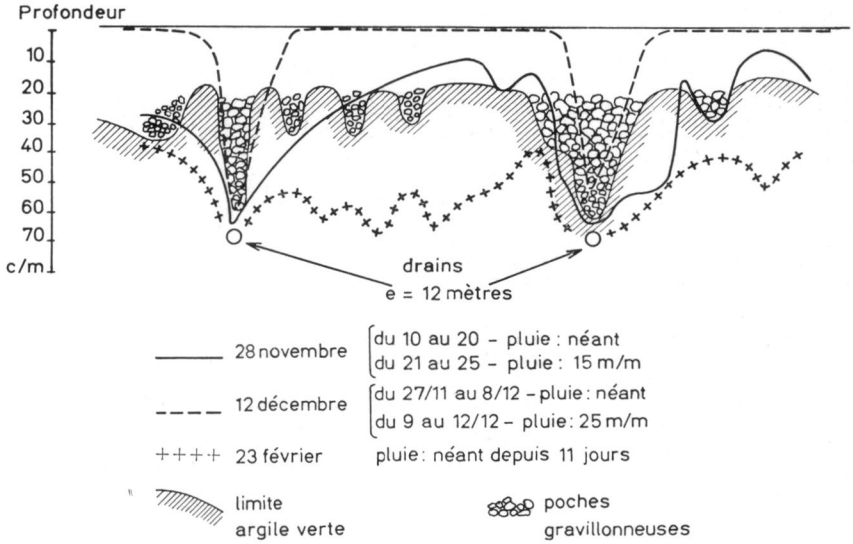


FIG. 26. — *La Roche : variation de la nappe entre drains*

— *le 12 décembre,* à la fin d'une pluie de 25 mm (tombée en trois jours) succédant à une période sèche de 12 jours, le sol est gorgé d'eau : la nappe est tabulaire avec une chute brusque à l'emplacemement des drains sur une largeur de deux mètres seulement.

A partir de ce moment, le débit du collecteur n'accuse plus de pointe sensible au moment des pluies et devient trop faible pour ressuyer rapidement le terrain.

— *le 23 février,* — après 11 jours sans pluie (et un temps ensoleillé), le sol est assez bien égoutté, mais le niveau de la nappe est fantaisiste par rapport à l'emplacement des drains.

Pratiquement la nappe va désormais osciller entre ce niveau minimum et l'ennoyage total ; le collecteur « suinte » pour s'arrêter totalement début mai, même après de violents orages qui transforment le secteur en lac pendant plusieurs jours.

La forme de la nappe reste donc sensiblement elliptique tant que le sol n'est pas complètement réhumecté, c'est-à-dire tant qu'il existe une perméabilité de fissure. Mais l' « argile verte », caractérisée par son fort retrait par dessiccation, s'imperméabilise progressivement par gonflement lors de la réhumectation.

L'année suivante, après un été très sec, le réseau de drainage a fonctionné normalement et le sol est resté sain. Par contre, après un début d'automne par-

ticulièrement pluvieux la 3e année (1960), le terrain a été imperméabilisé dès novembre ; le collecteur n'a pratiquement pas coulé au cours de l'hiver.

Nous reviendrons dans l'étude générale finale sur le problème théorique et pratique posé par le drainage d'un tel type de sol.

b) *Le profil hydrique*

Des profils hydriques ont été suivis au cours de la deuxième année qui a suivi le drainage, année où le réseau de drains a fonctionné correctement. Contrairement au cas précédent de la Prêle, les humidités sont très variables à un même niveau, essentiellement liées à la présence de l'argile verte. A un instant donné, cette humidité dans l'argile ne dépend que de sa distance à la partie supérieure de cet horizon et non de la nature de ce qui est au-dessus (gravillons ou terre végétale). C'est la raison pour laquelle la figure 27 dégage 2 gammes d'humidité, entre 30 et 50 cm qui correspondent aux deux séries de données analytiques du tableau 14 précédent.

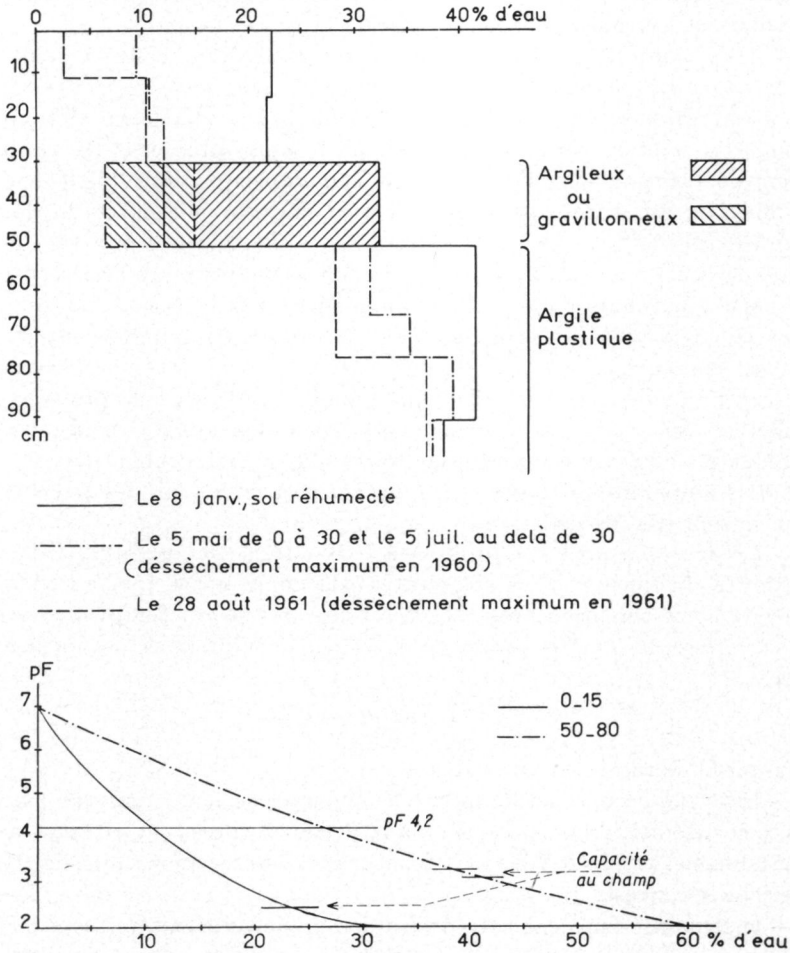


FIG. 27. — *La Roche : sol argileux*

En haut : profils hydriques (sous blé — 1959-1960), *En bas* : courbe de pF.

— *La réhumectation* ne se fait pas de façon « normale » : les drains ont commencé à couler le 18 novembre, c'est-à-dire pratiquement en même temps, à quelques jours près, que les sols de sables de la Biénaise. A cette époque, le profil était loin d'être réhumecté mais le desséchement provoqué par l'été 1959 facilitait une perméabilité de fissure accusée et un excellent drainage franc et brutal comme sur des sables.

La réhumectation était totale jusqu'aux drains fin décembre ; elle est traduite sur le graphique par le profil du 8 janvier, qui s'est maintenu à ce niveau jusqu'à mi-avril. Dans cet intervalle, les drains n'ont pas cessé de couler, mais avec des pointes de moins en moins marquées pendant les 5 à 6 jours qui suivent une pluie.

— *La capacité au champ* peut donc être considérée comme légèrement inférieure à l'humidité moyenne maintenue au cours de l'hiver ; en dehors des périodes très pluvieuses, elle correspond sensiblement à 22 p. 100 d'eau pour l'horizon superficiel, soit pour la terre fine un pF voisin de 2,4. En profondeur, l'humidité de 40 à 42 p. 100 observée dans l'argile jusqu'à 80 cm correspond à un pF légèrement supérieur à 3. Au-delà, l'argile ne paraît pas totalement réhumectée ; ce point particulier sera repris dans les conclusions d'ordre général.

— *Le desséchement* maximum observé correspond aux dates du 5 mai jusqu'à 30 cm et 5 juillet en profondeur. La dessiccation de l'argile verte s'est faite par tranches successives correspondant probablement à la fois au développement du front racinaire et à une contribution par capillarité des couches plus profondes (HALLAIRE, 1958), ici remarquablement homogènes. On peut remarquer toutefois que le desséchement maximum atteint correspond à des pF bien inférieurs au point de flétrissement permanent (pF de 3,8 à 3,2), c'est-à-dire à une utilisation très partielle de l'eau.

Les observations se sont poursuivies en 1961 et ont permis de préciser deux points :

— par les grandes pluies de l'automne 1961, le profil s'est à nouveau colmaté, comme en 1958-59 : le réseau de drains en année exceptionnellement pluvieuse perd son efficacité.

— en fin de l'été très sec 1961 (après une mauvaise orge de printemps récoltée en juillet), l'argile verte a accusé une dessiccation plus poussée qu'en 1960 (pF de 4,1 à 25 cm et 3,3 à 80 cm), traduisant la disponibilité de réserves plus importantes qu'en 1960. Mais l'humidité est restée constante au-delà de 80 cm : les réserves plus profondes ne sont pas utilisées.

— *Les réserves hydriques utilisées* de ces sols dans les conditions actuelles sont plus importantes qu'ailleurs : elles semblent s'échelonner entre 120 et 160 mm.

Toute autre condition mise à part, les cultures de printemps n'y souffrent pas de la sécheresse, et sous cet aspect on se trouve ici en présence des meilleurs sols de Brenne.

c) *Le profil cultural*

Le profil cultural met en évidence :

— la bonne occupation de la couche superficielle mais dans des conditions de porosité et d'aération moins bonne qu'à la Prêle. Le travail du sol (plus argileux) y est plus difficile, la sole de labour nette, et le gley assez systématique dans cette zone en période pluvieuse.

— la structure finement polyédrique de l'argile verte relativement bien occupée par les racines dans ses 20 premiers centimètres. Ici, dans ces sols incultivables sans assainissement, l'occupation encore insuffisante un an après drainage paraît beaucoup

plus liée à un état antérieur de « non culture » et à la sole de labour qu'à un défaut fondamental de structure de cette argile elle-même. Quoi qu'il en soit, l'enracinement de céréales ne dépasse pas 50 à 60 cm, à densité d'ailleurs très faible à ce niveau.

Si l'enracinement arrivait à être plus profond, les réserves en eau utilisables atteindraient ici facilement 200 mm, couvrant sensiblement les besoins de l'évapotranspiration de l'année moyenne.

Il ne faut pas toutefois minimiser l'obstacle : la perméabilité de cette argile est très faible lorsqu'elle a gonflé ; par une réhumectation maximum au cours d'une période pluvieuse, le profil se colmate totalement. Malgré cela, on peut parler d'une efficacité certaine du drainage qui permet l'évacuation rapide des pluies tant que la perméabilité n'a pas disparu et en conséquence un travail normal du sol et une mise en culture convenable.

d) *Les analyses physiques*

— *Les tests d'instabilité* mettent en évidence une stabilité assez bonne de ces sols ; l'argile présente un faible pourcentage d'agrégats stables après prétraitement benzène, dû à l'absence presque totale de résidus organiques. Mais la perméabilité n'est pas nulle, même dans les conditions d'ennoyage requises par le test ; il n'y a aucune dispersion et les eaux de drainage restent limpides. Dans ce cas particulier toutefois une prolongation du temps d'écoulement sous charge constante paraît nécessaire : si le coefficient K calculé d'après le volume d'eau écoulé en 1 heure atteint 1,7, le même échantillon après 4 heures de mise en charge a évolué vers l'imperméabilisation (K = 0,8).

La stabilité du milieu permet de se demander a priori si le drainage par poterie ne pourrait être remplacé par un drainage-taupe (HÉNIN-FEODOROFF, 1958). La stabilité est peut-être trop « limite » puisque les calculs par les formules de régression à partir de log 10 S ou log 10 S et log 10 K donnent comme note de comportement 3 à 4. Mais en outre la variabilité du niveau d'affleurement de cette argile et la présence des poches gravillonneuses plus ou moins argileuses vouent à l'échec une telle opéra-

TABLEAU 15

La Roche. Quelques caractéristiques physiques du profil

Profondeur	Capacité au champ	humidité corresp. à terre fine	pF correspondant	Microporosité	Macroporosité	Micro por. / Macro por.	Limite liquidité	Limite plasticité	Indice plasticité
0-20	22	25	2,4				31	20,4	10,6
20-30	21	24		32	9	3,5			
30-50 ..... Gravilloneux type La Prêle	12	20		21	18	1,1			
30-50 ..... Argile verte sableuse	32	33		41	11	3,7	44,6	14,8	29,8
40-80 ..... Argile verte plastique	41	41	3,2	49	6	8	66,5	24,6	41,9

tion. Tout au plus pourrait-on, peut-être, considérer celle-ci comme un complément du drainage par poterie la première année pour accélérer l'évacuation de l'eau et corollairement l'occupation du profil par la végétation ; les passages de l'obus devraient évidemment recouper les lignes de drains sans y toucher.

— *La porosité.* Les différentes composantes de la porosité (tableau 15) mettent en évidence la propriété « gonflante » de l'argile qui par son fort retrait, donne une densité apparente faible et une porosité totale particulièrement élevée (52 et 55 p. 100) pour la Brenne ; mais la porosité fine est ici très forte et l'espace libre pour l'air, à la capacité au champ est particulièrement restreint (rapport micro-macroporosité 3,7).

γ) *Les mesures de plasticité* présentent ici quelque intérêt :

— en surface, les limites, supérieure et inférieure, correspondant respectivement à des pF de 2 et 2,7 ; l'intervalle entre la capacité au champ et la limite inférieure est relativement faible, ce qui explique les difficultés de travail de ce sol.

— en profondeur, dans l'argile, la limite supérieure correspond à un état de non-ressuyage accentué (pF très inférieur à 2) et la limite inférieure à un niveau de dessiccation déjà poussé (pF 4) ; ces données sont à retenir en cas d'éventuel travail du sous-sol, qu'il s'agisse d'un drainage-taupe (en mileu plastique) ou d'un sous-solage (en milieu sec). Nous reviendrons sur ces notions dans le chapitre de synthèse générale.

e) *Le niveau chimique*

— le sol est pauvre en acide phosphorique sur tout le profil et d'un pouvoir adsorbant relativement élevé, donc difficile à enrichir ;

— en potassium par contre on se trouve devant le seul type de sol en Brenne naturellement riche (sol probablement dérivé des argiles cénomaniennes glauconieuses).

f) *Conclusions*

Les sols « à argile verte » de bordure nord de Brenne, sont caractérisés par :

— une perméabilité de fissure qui tend à s'annuler en régime pluvieux permanent et par conséquent à limiter l'effet du drainage en année exceptionnellement humide ;

— des réserves hydriques importantes ;

— mais une utilisation encore relativement limitée de ces réserves par un enracinement insuffisant en profondeur ;

— un niveau phosphorique faible en profondeur et difficile à remonter.

Un développement radiculaire convenable devrait permettre de maintenir une perméabilité de fissure suffisante et de rendre accessibles des réserves hydriques au moins égales au déficit de l'année moyenne.

Les argiles à silex un peu plus au nord présentent à peu près les mêmes caractéristiques avec une gamme de variations assez larges dans la teneur en argile (voir profil n° 21, fig : 10). Les tests d'instabilité sont aussi sensiblement les mêmes ; mais il n'y a pas ici de poches de gravillons alluvionnaires ; le drainage-taupe reste peut-être possible, étant entendu d'ailleurs qu'il ne faut pas compter sur sa très longue efficacité. Il pourrait être utile dans les secteurs très caillouteux à petits silex enchâssés dans l'argile où les travaux classiques de drainage restent très coûteux mais où un obus draineur doit pouvoir passer avec des moyens de traction suffisants.

5° Les sols dégradés d'apparence podzolique

1er Type : Claise, type c (voir page 151).

Sols très dégradés par l'hydromorphie. Ils se présentent comme il a été dit sous forme de trois horizons successifs nettement différenciés :

— une couche sableuse, humifiée foncée,

— un horizon dit A_2 de même texture qu'au-dessus, mais très blanchi à structure pelliculaire, cimentée. La délimination des deux horizons est très nette et brutale. Le long des racines, des infiltrations de matières organiques y dessinent des traînées plus foncées. Des nodules de fer se rencontrent de place en place.

— l'argile marmorisée de Brenne très grossièrement structurée (mottes de plus de 10 cm particulièrement compactes, séparées par un enracinement ancien).

Dans l'exemple choisi, les sables sont très triés localisés entre 200 et 300 μ (voir courbe 605 fig : 10).

Le tableau 16 précise les caractéristiques du profil étudié.

TABLEAU 16

La Claise. Sol d'apparence podzolique

Profondeur	0-25	25-55	55-70
Analyse granulométrique			
Terre fine %	100	100	100
Argile %	9	10	42
Limons + sables très fins	20	23	16
Sables fins	23	22	12
Sables grossiers	46	45	30
Matière organique	1,7	0,5	0,5
pH	6,6	7,0	5,0
Densité apparente	1,42	1,68	
réelle	2,58	2,62	
Porosité	45	37	
Tests d'instabilité			
AgO % (1)	52	40,4	31
AgB % (2)	50	41	28
AgA % (3)	51	45	37
Indice S	0,62	4,0	7,5
— K	3,4	0,4	0,1
Niveau chimique			
K échangeable g/kg	0,02	0,01	0,05
K (B. M.) (4)	8	5	14
P solution du sol en mg/litre	0,25	0,18	0,22

(1) AgO sans prétraitement. (2) AgB prétraitement benzène.
(3) AgA prétraitement alcool. (4) K (Morgan-Barbier modifié).

a) *Le profil hydrique*

Il s'agit d'un profil sous prairie (trèfle blanc-dactyle) semé à la fin de l'été précédent, bien vigoureux au printemps suivant.

L'écoulement des drains n'avait pas de signification ici où le collecteur draine des types de sols trop différents et surtout l'excès d'eau de l'étang en bordure de la route.

L'examen de l'évolution du profil (figure 28) et du terrain permet différentes observations.

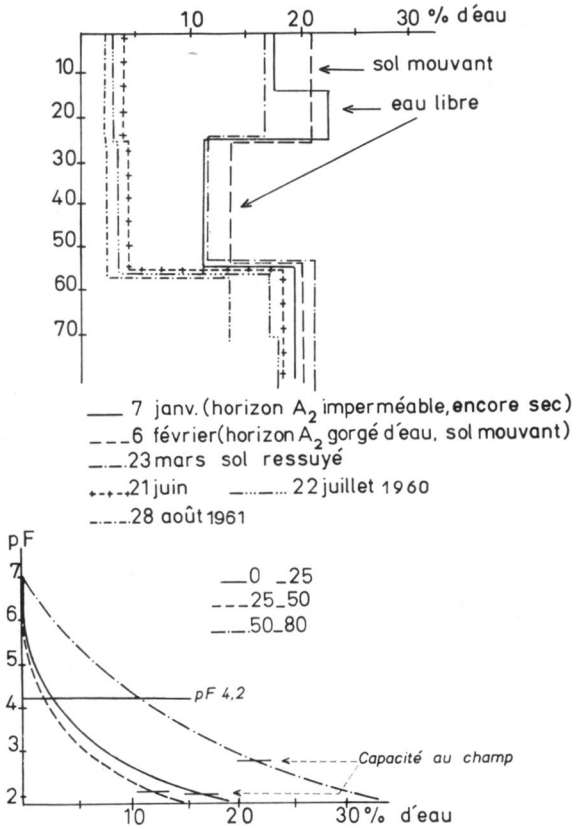


FIG. 28. — *La Claise, type* c *: sol d'apparence podzolique très dégradé*
En haut : profil hydrique 1959-60-61 sous prairie,
En bas : courbe de pF.

— *A la réhumectation,* les premières pluies tombent sur le sol desséché et « cimenté » entre 25 et 50 cm, s'infiltrent bien jusqu'au moment où ce deuxième horizon atteint un certain degré d'humidité (ici 11 p. 100) ; au cours de cette réhumectation, l'horizon blanchi, vrai béton à attaquer au pic quand il est sec, s'ameublit comme un sable.

Brutalement, lorsque ce degré d'humidité est atteint, l'horizon devient fluent ; sa perméabilité devient insignifiante et une circulation d'eau horizontale s'établit à son contact à la base de l'horizon humifié.

Progressivement toute la surface sableuse se gorge d'eau, même en pleine pente, et le sol devient « mouvant ». Il faudra attendre fin mars début avril en année normale pour pouvoir rentrer à nouveau sur le terrain.

— *La capacité au champ* est difficile à définir dans ces conditions puisque le sol reste gorgé d'eau lontemps. Néanmoins, elle semble pouvoir être considérée comme voisine de l'humidité en place juste avant que l'horizon A_2 se transforme en boue pour la couche superficielle et dès qu'on ne voit plus d'eau sourdre dans le sondage pour le sous-sol. Pratiquement ces points correspondent à :

— 17 ou 18 p. 100 pour la couche humifiée,
— 11 à 12 p. 100 pour l'horizon A_2,
— 20 à 21 p. 100 pour l'argile jusqu'à 75 cm.

A ces humidités correspondent des potentiels capillaires différents (tableau 17) :
— pF de 2,0 à 2,1 pour les horizons sableux (humifié et A_2)
— pF de 2,7 à 2,8 pour les sous-sols argileux.

TABLEAU 17

La Claise. Quelques caractéristiques physiques

profondeur	Capacité au champ	pF correspondant	Microporosité	Macroporosité	Micro/Macro poros.	Limite liquidité	Limite plasticité	Indice plasticité
0-25	17,5	2,0	25	20	1,2	16,2		
25-55	12	2,1	19,5	17	1,1	14,7	9,3	5,4
55-70	21	2,8				35,6	18,3	17,3

— *Le desséchement* est ensuite très rapide, maximum en 1960 dès début juin (80 mm) sans que les réserves du niveau argileux soient vraiment mises à contribution (pF 3.2 au maximum de desséchement). En surface, le point de flétrissement permanent est atteint et la survie se maintient apparemment grâce aux quelques racines pénétrées profondément qui peuvent attendre les pluies de l'automne suivant. Ce même fourrage bien handicapé mais plus âgé, a pu, au cours de l'été 1961 très sec, réussir à décaler le niveau argileux vers le desséchement, « récupérant » ainsi environ 15 à 30 mm supplémentaires ; le desséchement maximum possible a pratiquement été atteint (pF 4) jusqu'à 70 cm.

— *Les réserves hydriques* utilisées ont donc été de 80 mm en 1960 et 100 en 1961 ; il semble que l'horizon argileux n'ait pas encore livré toutes ses possibilités en profondeur.

b) *Le profil cultural*

L'examen du profil cultural est particulièrement instructif : les racines de prairie sont littéralement bloquées au niveau supérieur de l'horizon blanchi la première année, Asphyxiées l'hiver, elles ne le traversent que de façon sporadique la deuxième année, pour se ramifier péniblement autour des grosses mottes d'argile ; elles restent insuffisantes pour exploiter ce niveau.

Les betteraves sont encore plus défavorisées : incapables de traverser la zone cimentée, elles n'ont survécu en 1960 que grâce à l'été pluvieux qui a maintenu une

absorption par les racines horizontales à la base de l'horizon humifié ; le maïs a été beaucoup plus vigoureux. La luzerne, seule, a réussi à pénétrer et à utiliser les réserves profondes dès la première année, mais elle est incapable de résister à l'ennoyage prolongé d'hiver.

c) *Les analyses physiques.*

— *Les tests* d'instabilité traduisent ce comportement au champ :

— en surface un indice d'instabilité variant de 0,6 sous prairie à 1,9 sous plante sarclée — avec un test de perméabilité de 3,4 à 1.8, chiffre d'ailleurs assez faible pour un sable, et qui se répercute, comme on le verra plus loin dans la partie générale, sur la pénétrabilité très moyenne des pluies ;

— un horizon blanchi, très instable et imperméable malgré des composantes granulométriques sableuses.

— une argile profonde également imperméable par son instabilité à l'eau qui entraîne son effondrement (eaux troubles).

En fait ici une remarque s'impose : les grosses mottes sur le terrain sont parfaitement protégées par une gangue de vieilles racines décomposées de teinte gris mauve. Par contre, l'intérieur des mottes n'est pas stable ; c'est par conséquent la préparation de l'échantillon pour le test qui est responsable de la mise en évidence d'une propriété à vrai dire non visible en plein champ. Cette remarque peut permettre d'expliquer également la variabilité des chiffres obtenus sur différents prélèvements : S varie en fait de 2,5 à 13 tandis que K s'étage parallèlement de 1,8 à 0,09. Une mesure de stabilité sur mottes pourrait favorablement se concevoir (BRYSSINE, 1953) ;

— *La porosité* totale n'a pas de signification dans l'horizon profond très grossièrement structuré à mottes bien individualisées ; seule une porosité mottière pourrait avoir un sens. Dans l'horizon blanchi, la faible porosité (37 p. 100) traduit la compacité accentuée ; mais la capacité de rétention réduite de ce milieu quartzeux permet un rapport convenable, voisin de 1, entre la phase liquide et la phase gazeuse quand le sol est ressuyé. Cela explique l'apparence d' « aération » de l'horizon mais ne préjuge en rien des possibilités de circulation donc de renouvellement de l'air. Nous reviendrons également sur ce point dans la synthèse générale.

— *Les mesures de plasticité* n'ont pas d'intérêt en sol sableux où la limite inférieure n'est même pas mesurable. On peut remarquer par contre pour l'argile, un indice relativement faible par rapport à celui de l' « argile verte» du cas précédent (horizon médian), malgré un taux d'argile à peine inférieur ; la limite de plasticité correspond à un pF beaucoup moins élevé, ici voisin de 3. Ceci explique l'apparence toujours sèche des vraies argiles de Brenne qui, même réhumectées, restent cassantes, et non plastiques.

d) *Le niveau chimique.*

— le sol est très pauvre en K et en P.

— le pouvoir adsorbant très faible vis-à-vis de P permet l'enrichissement rapide des horizons A_1 et A_2 sous l'influence de faibles fumures.

e) *Conclusions.*

Nous sommes ici sur les plus mauvais sols de Brenne par défaut de stabilité structurale. L'horizon blanchi dégradé forme obstacle à la pénétration de l'eau en profondeur vers les drains et obstacle à l'enracinement ultérieur. Dans ces conditions

le drainage est inefficace et les sols sont par la suite aussi « secs » que les sables grossiers de la Biénaise, malgré une réserve hydrique plus importante dans l'argile sous-jacente.

Le problème qui se pose est de savoir s'il est possible d'améliorer cette structure de l'horizon blanchi et par quels moyens.

Dans le cadre de l'aménagement de tels sols, une difficulté supplémentaire réside dans la variabilité des dépôts à l'échelle même de la parcelle qui rend inutile l'emploi de « grands moyens » sur la totalité de la surface mais rend également inutile l'aménagement du reste s'il doit rester des points d' « embourbage » pour les machines.

AUTRES TYPES.

Les deux autres types de sols à Claise, types *a* et *b* (voir page 153) correspondent à deux autres comportements très différents :

Le type a correspond à des sols de mêmes sables fins mais profonds avec faible accumulation argileuse au-delà de 70 cm. L'horizon A_2 est très irrégulier, soit simplement lessivé, soit blanchi, mais il n'atteint jamais dans ce cas la compacité du type précédent et reste perméable. Les réserves hydriques restent faibles par la faible capacité de rétention le long de tout le profil mais l'exploitation radiculaire

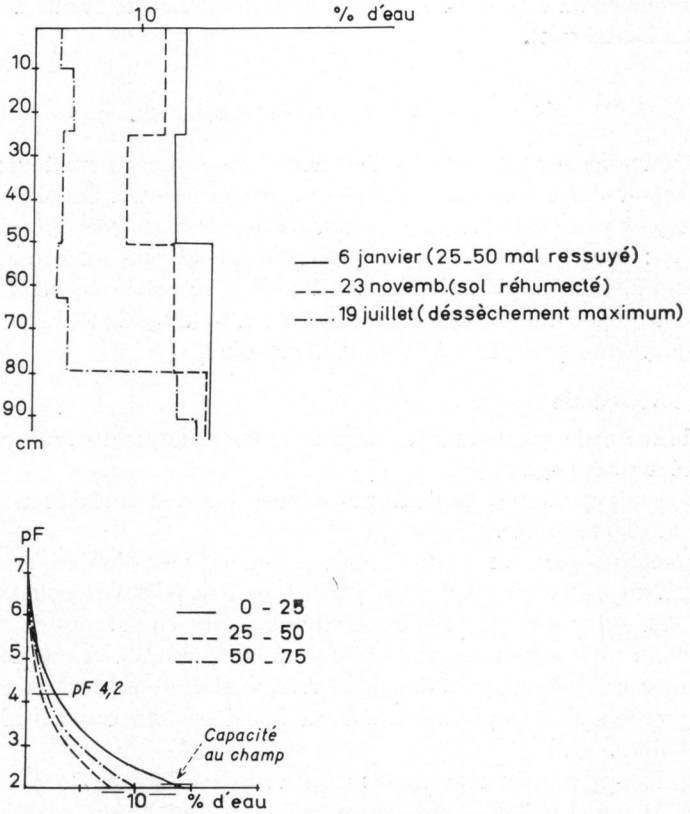


FIG. 29. — *La Claise ; sol de sable fin profond*
En haut : profil hydrique sous luzerne de l'année,
En bas : courbe de pF.

est plus profonde et la luzerne-fétuque a extrait de ces sols 100 mm d'eau dès sa première année (figure 29). Dans ces sols particulièrement sableux, la capacité au champ semble se situer légèrement en dessous du pF 2.

TABLEAU 18

La Claise. Sables profonds (Type a*)*

Profondeur	Densité apparente	Porosité totale	Capacité au champ	pF correspondant	Micro-porosité	Macro-porosité	Micro/macro porosité
0-25	1,28	59	14	2,1	18	32	0,55
25-50	1,51	42	13	< 2	19,5	20,5	0,95
50-80	1,57	41	16	< 2	25	16	1,5

Ce sol est peu hydromorphe et peu dégradé dans l'ensemble ; les racines marquent toutefois un temps d'arrêt dans leur développement au contact de l'horizon A_2.

Le type b qui correspond aux thalwegs est intermédiaire entre *a* et *c* ; c'est-à-dire plus perméable que sur la butte (type *c*), mais la couche arable est infiltrée de limons colluvionnés lui conférant le comportement qui va être étudié dans les pages suivantes (La Bertellerie).

6° Les sols fins limono-argileux.

On se trouve ici sur les placages d'éléments fins dispersés sur toute la Brenne, plus importants dans les zones périphériques qu'en plein centre. Ces placages peuvent être relativement peu épais, de 50 à 70 cm, au-dessus d'un grès plus grossier (Les Brandes, page : 154). Ils peuvent être considérablement plus importants (plage de Nuret-le-Ferron). Leur origine n'a pas été définie avec précision, mais semble bien être un type de dépôt sidérolithique (voir annexe 1, sondage de Rosnay présence du même grès, argileux à grain très fin qu'à la Bertellerie).

1er type. La Bertellerie

N.-O. de la Brenne (Commune de Martizay). Une analyse des grès qui dominent la pièce a été donnée page 159.

La pièce avait été drainée en fin de printemps 1959 et ensemencée en blé dès début octobre de la même année.

Les caractéristiques du profil hydrique retenu font l'objet du tableau 19.

Il s'agit d'un sol très fin, rapidement transformé en poussière colmatant de gros blocs cimentés, s'il y a eu la moindre erreur dans les conditions de travail. Aux premières pluies, tout s'effondre en une boue collante jusqu'à la sole de labour vers — 15 cm. ; toute nouvelle intervention devient impossible (d'où la raison de semis d'automne très précoces). Un gley intense se développe dans cette couche qui reste gorgée d'eau tout l'hiver.

L'horizon 20-35 est très hétérogène : ici podzolisé et dégradé (horizon A_2 blanchi et compact), là plus argileux, simplement marmorisé et moins compact. Dans le tableau 19, il s'agit d'un profil à horizon A_2. Mais en tout état de cause on n'atteint jamais la dégradation du type précédent (Claise).

TABLEAU 19

La Bertellerie. Sol limono-argileux

Profondeur	0-20	20-35	35-50	50-80
Analyse granulométrique				
Terre fine %	97	99	100	100
Argile %	17,5	21	62	58
Limons + sables très fins	42,5	43	23	22
Sables fins	17,5	14	7	10
Sables grossiers	20,5	20,5	7	9
Matière organique	2,2	1,4	0,8	5,0
pH	6,8	7,2	5,0	
Densité apparente	1,53	1,62	1,48	
— réelle	2,60	2,61	2,67	
Porosité	41	38	45,5	
Tests HÉNIN				
AgO % (1)	36	40,5	50	
AgB % (2)	22	18,5	14,5	
AgA % (3)	53	57,5	44,5	
Indice S	1,26	1,28	0,87	
— K	2,4	1,57	3,3	
Niveau chimique				
K échangeable g/kg	0,04	0,08	0,07	
K (B. M.) (4)	35	18	28	
P solution du sol en mg/l	0,22	0,20	0,45	

(1) AgO sans prétraitement. (2) AgB prétraitement benzène,
(3) AgA prétraitement alcool. (4) K (MORGAN-BARBIER modifié.)

L'argile gris bleuté avec marmorisation ocre sur les 20 premiers centimètres se présente sous une structure prismatique assez fine, avec des mottes refendues horizontalement de 4 à 5 cm au maximum qui, par dessiccation, se délitent en petits polyèdres (même type de structure que celle de l'argile verte).

a) *Le profil hydrique.*

Le profil hydrique, sous blé, évolue comme le montre la figure 30.

— *La réhumectation* est très spécifique du type de sol. Les premières grosses pluies arrivent rapidement à gorger d'eau la partie superficielle en ne réhumectant la profondeur que lentement. Les drains coulent très longtemps jusque fin avril, mais toujours faiblement sans que l'on enregistre de pointes très sensibles après les pluies.

— *La capacité au champ* est très difficile à préciser dans ces conditions surtout pour la couche superficielle ; on ne peut donner qu'un ordre de grandeur, une moyenne assortie d'écarts importants supérieurs à ± 10 p. 100 Approximativement cette capacité au champ correspond aux humidités et aux pF suivants :

— couche superficielle humifiée : 21 p. 100, pF 2,7 ;
— horizon sous-jacent (horizon A_2 dans l'exemple choisi) : 22 p. 100, pF 2,4 ;
— argile jusqu'à 60 cm : 29 p. 100, pF 2,9.

— *Au desséchement*, on constate à la différence du type précédent, une meilleure utilisation des réserves profondes (jusqu'à pF 3,6), encore plus poussée en 1961 sous orge de printemps qu'en 1960 (pF 3,9 observé jusqu'a 80 cm.) L'ordre de grandeur de ces réserves totales déduites du profil est de 150 mm, chiffre certainement trop faible car, pour ce type, nos mesures jusqu'à 80 cm se sont avérées nettement insuffisantes (voir figure 30). Comme dans le type d'argile verte, ces sols doivent couvrir les besoins de l'année « moyenne » ; ils possèdent un volant suffisant pour permettre aux cultures de résister facilement à des pointes accusées de sécheresse au printemps.

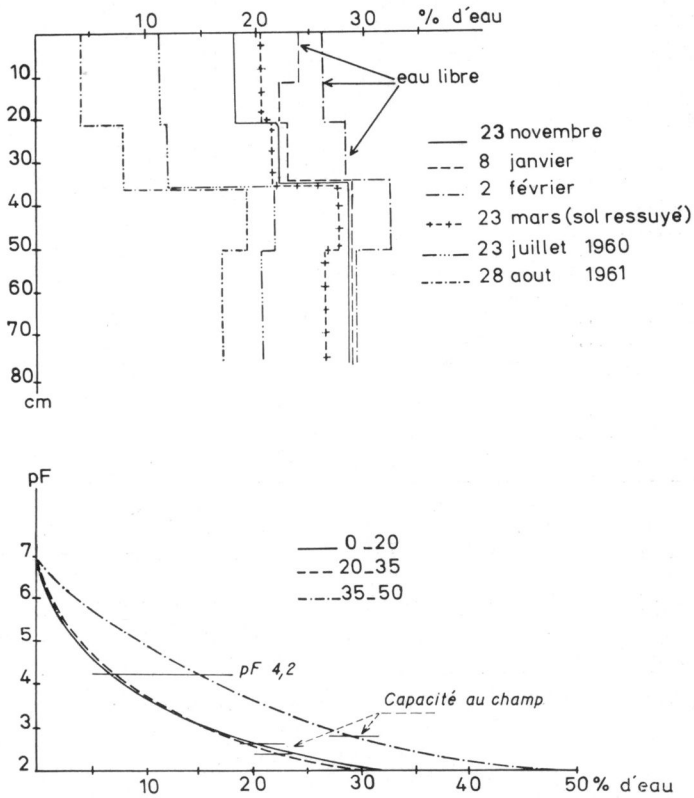


FIG. 30. — *La Bertellerie : sol très fin limoneux*
En haut : profil hydrique (sous blé — 1959-60-61),
En bas : courbe de pF.

b) *Le profil cultural*

Le profil cultural met en évidence la nécessité de poursuivre les sondages plus profondément ; le chevelu de radicelles est abondant à la limite supérieure de l'argile mais l'ensemble de la masse argileuse est exploitée : on retrouvait des racines vigoureuses de blé à — 70 en 1690. L'enracinement est apparu qualitativement encore plus puissant sous orge de printemps en 1961 ; ce qui permettait une exploitation plus poussée et explique l'importance relative des réserves hydriques de ce type de sol.

Par contre, le grave défaut est une *perméabilité superficielle* insuffisante ; celle-

ci est si mauvaise qu'en 1960 des maïs, pourtant semés après le ressuyage hivernal, avaient leurs racines entièrement gainées de rouille en septembre ; les pluies de l'été avaient suffi à gleyifier la surface au-dessus du profil desséché du mois de juillet.

c) *Les analyses physiques*

— *Les tests* d'instabilité traduisent bien la déficience de la surface par rapport à l'argile de profondeur :

— en surface l'indice d'instabilité varie en fait de 1,2 sous culture couvrante (blé) à 2,4 après jachère travaillée ou plante sarclée (maïs). Le pourcentage d'agrégats stables après prétraitement benzène passe de 30 à 20 p. 100. Le test de perméabilité varie parallèlement de 2,4 à 1,3.

— l'horizon intermédiaire voit son indice, encore plus variable, de 1,2 là où il n'est pas dégradé à 4,0 où il est blanchi, cimenté et moins pénétré. Le test de perméabilité ne traduit par contre pas ici cette nuance. En tout état de cause il n'y a aucune commune mesure entre l'horizon A_2 de Claise et ces « taches » blanches de La Bertellerie ;

— quant à l'argile, elle présente un meilleur comportement en place que l'argile verte ; elle est beaucoup mieux pénétrée par les racines. Les chiffres pour S et K sont bien constants entre les prélèvements ; la note de comportement est meilleure.

Le drainage par charrue-taupe semblerait pourtant devoir être aléatoire à cause de l'hétérogénéité de l'horizon A_2 plus ou moins colmatant. Malgré la bonne stabilité de l'argile, les eaux de drainage coulent troubles ; le test de perméabilité montre que cette dispersion a lieu au niveau des horizons A_l et A_2.

— *Les différentes expressions de la porosité* montrent bien qu'effectivement en surface la phase gazeuse est réduite à la capacité au champ (micro-/macro-porosité = 2,8).

Le sous-sol argileux paraît particulièrement compact : ici l'argile ne subit pas de retrait et la porosité totale reste relativement faible (45 p. 100) ; la phase gazeuse est particulièrement réduite. Cette constatation est en apparente contradiction avec la bonne pénétration racinaire ; elle fait apparaître la nécessité de faire une distinction entre le volume d'air total disponible et la vitesse de circulation qui assure son renouvellement. Nous reviendrons sur cette remarque par la suite.

TABLEAU 20

La Bertellerie. Quelques caractéristiques physiques du profil

profondeur	Capacité au champ	pF correspondant	Micro-porosité	Micro-porosité	Micro/macro por.	Limite liquidité	Limite plasticité	Indice plasticité
0-25	21	2,7	32	9	2,8	22,6	16,6	5,6
25-35	22	2,4	35	3	1,1			
35-50	29	2,9	43	3	14	52	22,4	30

— *Les limites d'Atterberg* correspondent, en surface, aux pF 2,6 et 3, montrant à quel point le travail du sol peut-être difficile ici : la terre se pulvérise dans un état particulièrement défavorable à la structure si elle n'est pas prise dans un état d'humidité convenable, encore proche du ressuyage. Inversement le lissage est facile si elle

est encore mouillée et la dessiccation ultérieure aboutit rapidement à la formation de très grosses mottes cimentées (qu'il n'est plus possible de reprendre) et colmatées entre elles par une fine poussière.

L'argile en profondeur se rapproche de celles du centre Brenne, tout en étant d'apparence moins sèche (pF 3.3. à L I P.)

d) *Le niveau chimique*

Le niveau chimique est convenable sur tout le profil pour l'acide phosphorique, faible en profondeur pour le potassium.

e) *Conclusions*

Les sols limoneux sont caractérisés par :

— une perméabilité assez faible de la couche superficielle, de structure peu stable à l'eau. Corrélativement le travail du sol est particulièrement difficile ;

— des réserves hydriques satisfaisantes liées à une capacité de rétention convenable et à une exploitation radiculaire du profil beaucoup plus profonde que dans tous les types précédemment décrits.

Le seul problème posé par ces sols est celui de la création et du maintien d'une structure superficielle stable.

2e TYPE. Les Brandes (lieu dit)
Commune de Ciron (voir page : 49).

Ici le limon est moins épais, reposant sur grès entre 60 et 75 cm et l'horizon argileux est différent : ce n'est pas une argile plastique gris bleuté mais une argile plus « cassante » marbrée ocre, plus grossièrement structurée, beaucoup plus désaturée (taux de saturation 46 p. 100 au lieu de 84 p. 100) ; autrement dit une argile caractéristique du centre Brenne. L'enracinement en profondeur est plus limité à l'extérieur des mottes mais important jusqu'à 60 cm. Ces sols, particulièrement mal cultivés sont très acides dès la surface (pH 5,2.)

Malgré ces différences, le même comportement qu'à La Bertellerie a été montré : engorgement assez rapide de la couche superficielle, dessiccation progressive et assez poussée jusqu'au grès — d'où une réserve un peu plus faible liée à la différence de profondeur d'exploitation (figure : 31).

Il ressort toutefois une remarque importante : l'arène gréseuse participe aux mouments d'eau, ce qui explique la pénétration fréquemment observée des racines puissantes dans cette « roche » souvent consolidée.

TABLEAU 21

Les Brandes. Quelques caractéristiques physiques du profil

profondeur	Capacité au champ	pF correspondant	Densité apparente	Porosité totale	Microporosité	Macroporosité	Micro/macro por.	Limite liquidité	Limite plasticité	Indice plasticité
0-20.....	29	2,3						29,8	22,7	7,1
20-40.....	20	2,7	1,53	41	31	10	3,1	37,2	19,9	17,3
50-60.....	27,5	2,9	1,44	46	40	6	6,5	48	25,8	22,3

Les capacités aux champs correspondent, avec les mêmes restrictions que précédemment, aux potentiels capillaires de 2,4 en surface, 2,7 dans l'horizon « à tendance A_2 » , 2,9 dans l'argile.

Les tests d'instabilité donnent les mêmes résultats malgré la différence de type d'argile en profondeur.

Les caractéristiques physiques sont sensiblement les mêmes.

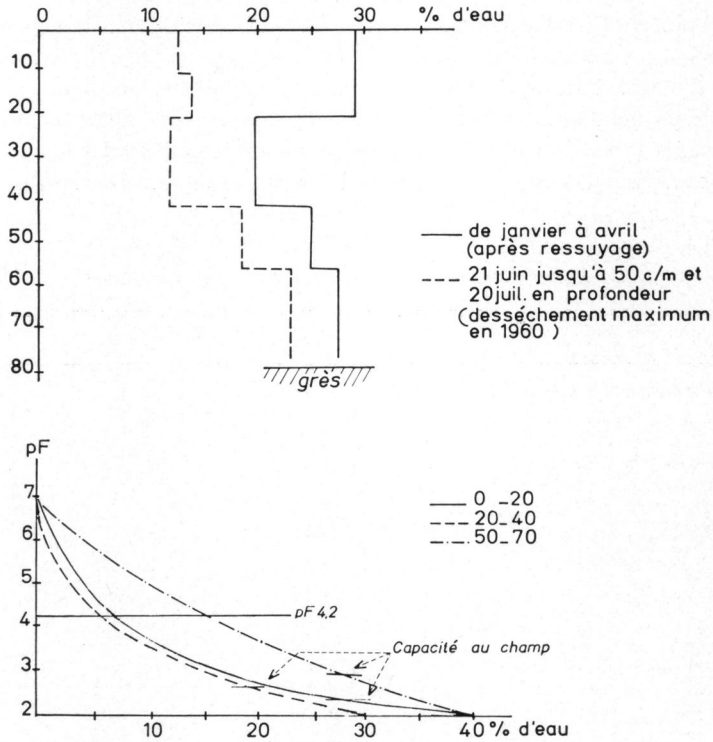


FIG. 31. — *Les Brandes : sol limoneux sur grès*
En haut : profil hydrique (sous blé — 1959-60),
En bas : courbe de pF.

Le travail du sol est difficile, les limites d'Atterberg correspondent à la gamme de pF comprise entre la capacité au champ et un pF encore élevé de 2,7.

En résumé : Malgré la différence apparente de sous-sol plus grossièrement structuré dans le 2e type que dans le 1er on retrouve schématiquement le même comportement : sol difficile mais sous-sol relativement bon pour la Brenne.

7° TYPE INTERMÉDIAIRE : SOL DÉGRADÉ
A APPARENCE PODZOLIQUE ET A TENDANCE LIMONEUSE EN SURFACE

Il s'agit ici d'un type de sol très répandu en Brenne, dégradé par l'hydromorphie qui entretient un horizon sableux blanchi, très mal structuré, entre la terre végétale et l'argile sous-jacente ; le sol a une composition granulométrique à prédominance limoneuse par rapport à l'argile (rapport supérieur à 3).

Comme on peut le penser a priori, ce type réunit les deux niveaux de mauvaise structure (profondeur et surface) mais chacun des deux défauts étant moins poussé à l'extrême, on aboutit à un type de comportement intermédiaire, d'autant plus intéressant qu'il est géographiquement important. Il a pu d'autre part être particulièrement bien étudié sous différentes conditions de culture suivies depuis 3 ans ; c'est par conséquent le type de sol dont on connaît le mieux les perspectives d'évolution.

L'exemple choisi est celui de la Plaine Ronde, située dans le centre sud de la Brenne dans la commune de Ciron. La courbe granulométrique n° 450 de la figure : 13 montre qu'il s'agit d'un dépôt peu trié ; celui-ci côtoie des « coulées » de cailloutis plus gros. Mais bien qu'il y ait un certain imbriquage des deux types, le secteur étudié dans une zone basse et plate de plusieurs hectares est relativement homogène.

Les caractéristiques physiques du profil retenu sont fournies dans le tableau 22 ci-dessous.

TABLEAU 22

La Plaine Ronde : sol limoneux d'apparence podzolique

Profondeur	0-25	25-45	45-80
Analyse granulométrique			
Terre fine	98	99	99
Argile %	12	13,5	48
Limons + sables très fins	46	45	28
Sables fins	19	18,5	10
Sables grossiers	20	22	13
Matière organique	2,4	1,1	0,7
pH	6,0	5,8	5,4
Densité apparente	1,42	1,63	1,48
— réelle	2,60	2,64	2,70
Porosité	45	38	45
Tests d'instabilité			
AgO % (1)	34	22	54
AgB % (2)	29	8,0	10,7
AgA % (3)	51	27,5	64
Indice S	1,19	4,1	1,62
— K	1,92	0,42	2,8
Niveau chimique			
K échangeable g/kg	0,03	0,03	0,08
K (B. M.) (4)	20	13	18
P solution du sol en mg/litre	0,16	0,13	0,11

(1) AgO sans prétraitement. (2) AgB prétraitement benzène.
(3) AgA prétraitement alcool. (4) K (MORGAN-BARBIER modifié).

L'horizon intermédiaire 25-45 est la zone dégradée, gorgée d'eau l'hiver, bétonnée l'été ; sa teneur en argile apparaît très variable (10 à 22 p. 100) mais sans influence notable sur son humidité à un moment donné. En profondeur, la teneur en argile est comprise entre 42 et 52 p. 100 ; celle-ci peut apparaître de même nature assez fine que ce qui est au-dessus ; elle peut, au contraire, être plus grossière à partir de

60 cm et former transition avec les zones caillouteuses signalées plus haut. Quoi qu'il en soit, elle est ici moins grossièrement structurée qu'à la Claise (mottes de quelques centimètres).

a) *Le profil hydrique*

Il a pu être suivi ici sous trois cultures différentes, l'une sous prairie de un an installée aussitôt après le drainage, l'autre sur un sol nu jusqu'en avril puis un jeune semis de prairie, un secteur en trèfle blanc — fétuque des prés, l'autre en luzerne-dactyle (figure 32).

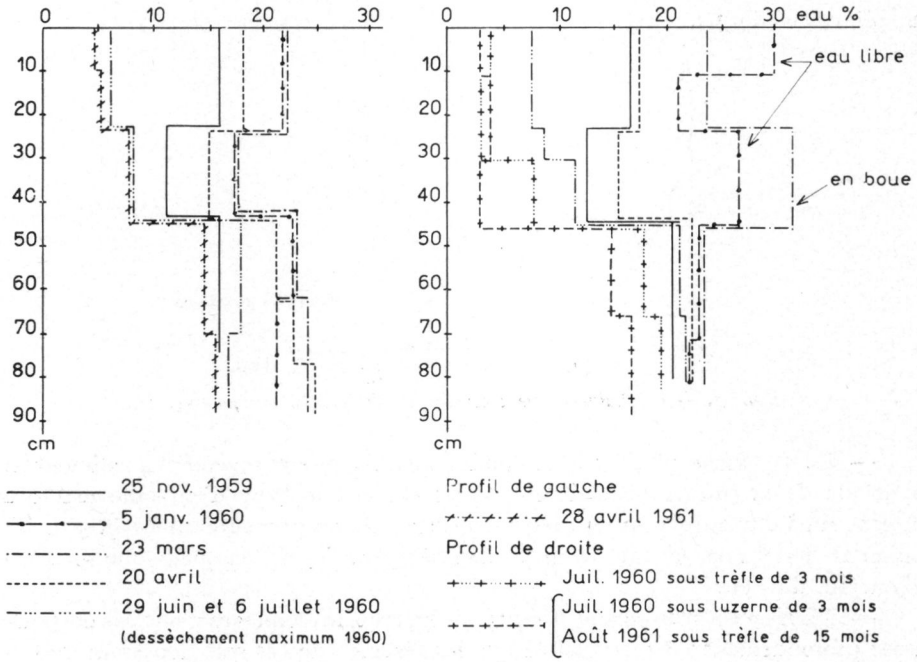


FIG. 32. — *La Plaine Ronde : sol limoneux d'apparence podzolique profils hydriques* 1959-60-61

A gauche : sous trèfle-fétuque semé au printemps 1959,
A droite : sol nu en hiver puis prairie semée au printemps 1960.

— *La réhumectation* se présente différemment sous prairie et sur sol nu :

— l'argile de profondeur est plus rapidement réhumectée sous sol nu, mais parce qu'au départ elle était moins sèche. Sous la prairie, la réhumectation se poursuit assez lentement, semble-t-il jusqu'en mars et par tranches successives ; le collecteur qui draine plusieurs types de sols n'a commencé à couler que vers le 20 décembre,

— l'horizon blanchi, s'il se gorge d'eau sous la prairie, n'en arrive jamais à se transformer en boue fluide comme sous le sol nu,

— La terre végétale se ressuie relativement bien sous prairie, elle retient l'eau longuement jusqu'à la sole de labour en sol nu. On ne retrouve toutefois pas ici le caractère de mouvance rencontré à Claise.

— *La capacité au champ* se définit relativement bien sous la prairie ; la comparaison avec le sol nu met en évidence à quel point cette notion reste liée à l'occupation végétale dans ces sols à structure instable à l'eau. Cette « capacité au champ » correspond sensiblement aux humidités et aux pF suivants (fig. 33) :

— horizon de surface : 18 p. 100 d'eau — pF 2,6 à 2,7,
— horizon A_2 : 15 à 16 p. 100 — pF 2,8,
— Argile jusqu'à 60 cm : 24 p. 100 — pF 3,1 à 3,2.

En fait l'argile présente différentes humidités, fonction de son niveau et du stade d'enracinement ; la réhumectation à 22 p. 100 en profondeur correspond à un pF voisin de 3,4.

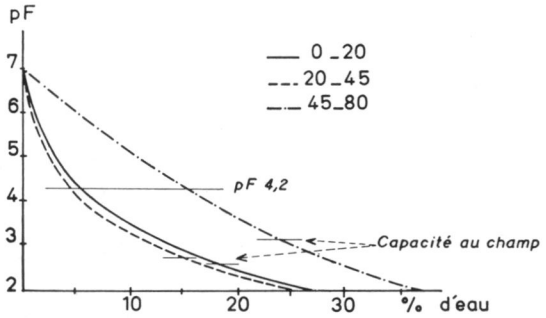


FIG. 33. — *La Plaine Ronde : courbes de pF (profils hydriques fig. 32)*

— *En desséchement,* l'argile profonde contribue progressivement à l'alimentation hydrique de la prairie mais différemment suivant le type d'enracinement : une luzerne du Poitou (pivotante) arrive à utiliser dès sa première année (à 3 mois) ce qu'un trèfle-fétuque n'utilisera qu'en deuxième année, et ceci quelle que soit la pluviométrie de l'été.

— *Les réserves hydriques utilisées* : Sous luzerne, les sondages n'ont pas été poussés assez profondément ; il est possible que les réserves de ces sols dépassent 120 mm.

b) *Le profil cultural*

L'examen du profil cultural montre la très faible exploitation radiculaire de l'horizon A_2 au départ, aussitôt après drainage et la difficulté qu'ont les racines de jeunes prairies pour le traverser la première année. Seule la luzerne y arrive et, comme on le voit, elle seule parvient à utiliser substantiellement les réserves plus profondes.

Progressivement l'année suivante, des faisceaux de chevelu occupent les canaux laissés par les premiers vers de terre et se ramifient dans l'argile qui prend une structure polyédrique plus fine.

c) *Les analyses physiques*

— *Les tests* traduisent très bien cette évolution ; les deux exemples des profils précédents permettent d'illustrer ces affirmations.

Le premier secteur correspond au profil hydrique de droite de la figure 32,

– les premières mesures sont faites en 1959, un an après drainage et en fin de végétation d'un deuxième blé (10 q) sur sol épuisé,

– la deuxième série de mesures en 1961, après un an de prairie semée sur sol recalcifié, nettoyé et fumé.

Le deuxième secteur correspond au profil hydrique de gauche de la figure 32 ; le sol avait été recalcifié et drainé en 1958, mal nettoyé avant le semis de prairie en 1959,

– premières mesures en 1960 après un an de prairie (trèfle blanc fétuque des prés),

– deuxièmes mesures en 1961 après deux ans de prairie.

TABLEAU 23

La Plaine Ronde. Tests d'instabilité structurale

	Surface		Horizon blanchi		Argile	
	S	K	S	K	S	K
— 1er *secteur*						
1959 (après deux blés)	1,19	1,92	4,1	0,42	2,06	1,31
1961 (sur prairie 1 an)						
— *a* trèfle-fétuque	0,75	12,7	2,11	1,15	1,75	4,95
— *b* luzerne-dactyle.....	1,22	6,8	3,83	1,05	1,52	5,8
— 2e *secteur*						
1960 (prairie 1 an)	1,04	2,4	3,23	0,6	1,62	2,8
1961 (prairie 2 ans).....	0,81	7,2	2,62	1,5	1,18	11,5

On juge dans les deux secteurs de l'efficacité de la prairie qui arrive à améliorer de façon substantielle les trois horizons considérés : les tests traduisent ce qui peut s'observer sur le terrain, ne serait-ce que la présence en 1961 de véritables « nids » de vers de terre à 60 cm au sein d'une argile qui était inoccupée deux ans plus tôt.

La différence d' « efficacité » des deux types de prairie sur le même sol sera discutée plus loin dans le chapitre final.

TABLEAU 24

La Plaine Ronde. Quelques caractéristiques physiques du profil

profondeur	Capacité au champ	pF correspondant	Microporosité	Macroporosité	$\frac{\text{Micro}}{\text{Macro}}$ por.	Limite liquidité	Limite plasticité	Indice plasticité
0-20	18	2,6-2,7	26	9	2,9	20,3	16,3	4,0
20-40	15,5	2,8	25	13	1,9	17,1	13,5	3,6
40-60	24	3,1-3,2	35,5	10	3,5	43,2	18,3	24,9

— *Les différentes composantes de la porosité* permettent de retrouver les mêmes caractères que dans les cas précédents :

– en surface, une porosité totale assez bonne (45 p. 100 mais une phase liquide beaucoup plus importante que la phase gazeuse à la capacité au champ (micro-/macro-porosité = 2,9), comme dans tous les sols de limons ;

– un horizon blanchi, dégradé par l'hydromorphie, très compact, de porosité totale faible (P = 38 p. 100) mais assez bien aéré, au moins quantitativement ;

– une argile de Brenne non « gonflante ».

— *Les limites d'Atterberg* confirment le faible intervalle de travail du sol possible (pF 2,5 et 2,9) encadrant de trop près le « ressuyage ».

d) *Le niveau chimique*

Tout le profil est très pauvre en acide phosphorique et potasse.

L'enrichissement est facile en K par simple drainage des excédents d'engrais.

Le pouvoir adsorbant vis-à-vis de P est élevé en surface et exige de fortes fumures, il est très élevé en profondeur (présence d'Al libre) et ne permet pas d'enrichissement sensible par lessivage naturel.

e) *Conclusions*

Ce type de sol très répandu en Brenne a un comportement intermédiaire entre le profil d'apparence podzolique très dégradé et le sol de limon :

— l'horizon A_2 peu stable à l'eau est un obstacle à une circulation normale de l'eau et à l'enracinement des cultures,

— la présence de limons rend le travail du sol difficile et limite sa perméabilité.

C'est donc à la fois une amélioration des conditions superficielles et une pénétration radiculaire plus profonde qu'il faut obtenir ; sous le 2e aspect, un niveau chimique insuffisant et difficile à relever complique le problème.

C. — Le problème général de l'azote en Brenne

Comme pour l'aspect chimique, le problème de l'azote en Brenne n'est qu'évoqué ici ; il fait d'ailleurs l'objet d'études en cours.

Des observations et mesures systématiques sur tous les types de profils ont mis ici en évidence les points communs suivants (S. PERIGAUD, 1960 et 1961) (1).

— Le rapport C/N de la matière organique est toujours élevé ; il est directement lié à l'importance de l'ennoyage et de la culture. Il atteint 17 en sol acide mouillé sous prairie extensive ; il peut descendre à 11 dans les sols moins hydromorphes et souvent labourés.

— Les céréales d'hiver souffrent d'une faim aiguë d'azote au moment du tallage malgré l'apport d'engrais azotés en couverture à des doses convenables (80 à 100 kg) ;

— les tests sur végétaux dépistent une carence azotée en Brenne beaucoup plus tôt que dans la région naturelle voisine, la Champagne berrichonne, soumise au même climat ;

— l'intensité de la carence azotée est fonction de l'année ; la réaction aux conditions climatiques est plus vive que dans les sols normaux ;

— le taux d'azote minéral dans le sol est pratiquement nul toute l'année, même après des apports azotés ; seuls les étés doux et humides permettent une minéralisation légère et brève ;

— le taux d'azote minéralisable est nul.

Des essais en laboratoire ont montré que l'absence d'N minéral dans le sol

(1) C. R. Travaux Stations agron. 1960 et 1961, Station agronomique de Châteauroux.

et l'inefficacité des fumures azotées sont dues à une « réorganisation » particulièrement intense et prolongée de l'azote dans le sol : l'N bloqué est entièrement récupérable par minéralisation ultérieure à l'étuve.

Ces blocages prolongés à température ordinaire sont en rapport avec l'état tassé des sols de Brenne, autrement dit avec leur structure peu stable à l'eau ; une aération par simple travail du sol en diminue l'importance.

Le rapport C/N et le pH du milieu n'interviennent que dans l'intensité du phénomène observé, plus accusé en sol pratiquement vierge qu'en sol déjà bien cultivé.

Ce « blocage » est proportionnellement d'autant plus marqué que la quantité d'azote apportée est plus faible ; seuls des apports substantiels laissent un excédent d'azote minéral libre dans le sol.

Conclusions

Dans les sols de Brenne, hydromorphes et mal structurés, qui s'égouttent mal même après drainage et restent extrêmement tassés, les apports d'azote minéral sont soumis immédiatement à une réorganisation intense et prolongée ; seules de très fortes doses laisseraient un excédent utilisable par les plantes .Une évolution biologique naturelle du sol sous l'influence d'une culture plus intensive en terrain mieux aéré par drainage doit diminuer progressivement l'importance de ces « blocages » et donner peu à peu à ces sols un comportement plus normal.

Dans l'immédiat, il faut moins envisager des fumures azotées substantielles trop coûteuses qu'une « mise en cultures » intensive, axée sur la reconstitution d'une structure stable ; dans cette optique, le choix des cultures est fondamental ; les blés d'hiver très exigeants en azote au moment où le sol est encore mal ressuyé et mal aéré sont évidemment à exclure.

L'intérêt probable d'enfouissements d'engrais verts à base de légumineuses (lupin) reste à vérifier.

III. — CONCLUSIONS : LES OBSTACLES A LA MISE EN VALEUR DE LA BRENNE, ET LES PERSPECTIVES D'AVENIR

A. — Les obstacles

Sous le seul aspect agronomique, les sols de Brenne présentent des obstacles sérieux à leur mise en valeur. Ces obstacles peuvent se résumer facilement comme suit, par ordre d'importance décroissante :

1° *Présence très fréquente de grès à faible profondeur.* — Le grès a une double conséquence défavorable : il augmente considérablement le coût des travaux de drainage et fait naître une certaine hésitation sur la rentabilité de tels aménagements, malgré leur efficacité technique indiscutable ; il limite de toute façon l'épaisseur du sol sableux, voué à rester sec malgré une contribution certaine de ce grès dans la rétention d'eau.

2° *Faible capacité de rétention en eau.* — Celle-ci est liée à une granulométrie souvent sableuse mais surtout à une exploitation radiculaire très superficielle, bloquée à la limite des horizons hydromorphes ; au-delà de 40 ou 50 cm l'humidité minima observée en été correspond à un potentiel capillaire inférieur à pF 3,8, parfois même moins (pF 3,2 dans les sols les plus mauvais).

3° *Perméabilité pratiquement nulle des horizons sableux* d'apparence podzolique, dégradés par l'hydromorphie.

L'imperméabilité est due à une instabilité à l'eau particulièrement accusée. Elle rend inefficace l'installation d'un réseau de drains ; elle s'accompagne d'une compacité extrême par dessiccation, et la formation d'un vrai « béton » constitue un obstacle supplémentaire à l'enracinement.

4° *Perméabilité superficielle faible des placages limoneux* et des colluvions de bas de pente.

Elle correspond aux sols qui retiennent le mieux l'eau mais qui s'égouttent lentement et ont une macroporosité faible. Ils « drainent » mal et corrélativement présentent des propriétés mécaniques qui rendent leur travail très difficile.

5° *Perméabilité très faible des profils argileux.* — Cette faible perméabilité est liée au gonflement de l'argile en régime pluvieux permanent et limite l'efficacité d'un réseau de drainage en période de pluie prolongée.

6° *Comportement biologique* particulier aboutissant au « blocage » intense par le sol des apports d'azote minéral. Cette rétention par le sol est liée au tassement par l'eau et à la vie microbienne ralentie par l'ennoyage prolongé.

7° *Niveau chimique très bas* lié à l'origine détritique du matériau et au système de culture extensif. Certains sols sont faciles à enrichir : ce sont les sables bien filtrants et de faible pouvoir adsorbant qui permettent un lessivage non seulement de K mais même de P. D'autres sols par contre posent le problème mécanique d'une fertilisation directe en profondeur.

Les différents obstacles de nature physique correspondent à des « types » bien définis de sols ; quelques-uns peuvent se cumuler sur un même profil et aggraver le problème.

B. — Perspectives d'avenir

La plupart des facteurs limitants non seulement de la production mais même parfois de l'efficacité d'un réseau de drainage, sont directement liés aux conditions actuelles d'hydromorphie. Le système cultural très extensif, qui entretient des terres sales et un niveau de fertilité très bas, n'est qu'une conséquence immédiate de cet excès d'eau. Le maintien des conditions défavorables à un enracinement normal des cultures rend les réserves hydriques inexploitables et les sols secs parce que biologiquement trop minces.

Autrement dit, la lutte contre l'excès d'eau doit atténuer l'insuffisance des réserves hydriques par défaut d'exploitation du sous-sol. Seuls quelques types de sols sont définitivement secs de par leur nature propre.

1° *La lutte contre l'hydromorphie.* — Dans l'optique de mise en valeur, le problème consiste à savoir si la pose d'un réseau de drains en poterie — technique d'assai-

nissement souhaitable pour la mécanisation des exploitations dans les conditions économiques et humaines présentes — est un moyen de lutte efficace contre cette hydromorphie.

Certains sols ne posent pas de problème grave ; il suffit de les drainer pour qu'ils se ressuient normalement. Ils deviennent faciles à travailler, s'aèrent et l'approfondissement radiculaire se fait naturellement dans les deux années qui suivent le drainage. Ces sols, relativement faciles, sont ceux qui ne présentent pas de défaut grave de structure à un quelconque niveau du profil.

D'autres sols par contre réagissent mal ; le drainage n'élimine que très médiocrement l'excès d'eau. C'est le cas des sols d'apparence podzolique, caractérisés par la présence d'un horizon « blanchi » cimenté, de structure particulièrement instable à l'eau. Le milieu reste gorgé d'eau pendant trop longtemps encore ; le développement racinaire reste faible, le peu de matière organique formé dans ces conditions n'a pas d'action stabilisante sur la structure ; pour ces sols le drainage ne résout pas immédiatement le problème de leur assainissement.

Comme on l'a vu dans les pages qui précèdent, l'efficacité des drains, à peu près nulle la première année, n'est toutefois plus négligeable en deuxième année. On décèle alors une contribution de l'argile du sous-sol dans l'alimentation hydrique des cultures ; le plafond arrive à se dessécher jusqu'au point de flétrissement permanent. C;est l'amorce d'une circulation d'eau et d'air et d'une pénétration radiculaire plus importante ; c'est un premier pas vers une amélioration de l'état physique.

Actuellement le point final de cette évolution n'est pas encore connu. Des travaux en cours orientés sur l'étude pratique des différents facteurs de l'enracinement tendent à préciser dans quelles mesures des techniques culturales complémentaires du drainage peuvent accélérer le mouvement naturellement amorcé.

2° *La lutte contre la sécheresse.* — Si la lutte contre l'hydromorphie permet d'améliorer l'accessibilité des réserves hydriques, certains sols resteront toujours secs ; tels les sols squelettiques sur grès ou les dépôts alluvionnaires caillouteux.

L'assolement à prévoir dans de tels cas doit être adapté aux conditions de sécheresse. L'irrigation devient un complément indispensable du drainage dans le cadre d'une intensification agricole systématique, étant entendu toutefois que l'arrosage de tels sols sera diffiicile à conduire (doses trop faibles).

IV. — QUELQUES ASPECTS GÉNÉRAUX DE PHYSIQUE DES SOLS

Quelques remarques d'ordre très général peuvent être tirées des multiples observations faites sur le terrain. La plupart ne font d'ailleurs qu'apporter une confirmation de données récemment acquises dans le domaine de la Dynamique de l'eau ((HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958) et de ses relations avec les propriétés structurales des sols (FEODOROFF A., 1961).

Dans un premier chapitre, les différentes composantes des réserves hydriques d'un sol sont rattachées aux mesures de potentiel capillaire. Dans le second chapitre, le comportement hydrique d'un sol est relié à la stabilité de sa structure.

A. — Réserves hydriques des sols et potentiels capillaires

La notion de « réserve hydrique » que le sol peut emmagasiner puis restituer à la végétation est considérée comme fondamentale dès que l'on parle de « vocation culturale » et d'aménagement hydraulique.

Comme on l'a vu précédemment dans le rappel préalable des définitions, cette notion reste liée à trois facteurs :

— la quantité d'eau disponible entre les deux humidités caractéristiques du sol : capacité de rétention (ou capacité au champ) et point de flétrissement permanent,

— la densité apparente, résultante de la porosité ;

— la profondeur utile du système radiculaire.

Les études pour la mise en valeur de la Brenne ont permis de préciser sur un plan très général les limites pratiques de ces concepts classiques.

Avant d'aborder la discussion sur la capacité au champ, une vue d'ensemble sur les différentes courbes de pF dont nous disposons paraît nécessaire.

1° Les courbes de potentiels capillaires

Rappelons qu'il s'agit de courbes de desséchement obtenues sur échantillon préalablement séché à l'air et tamisé à 2 mm dans les conditions habituelles. Les terres de Brenne ne contenant pratiquement pas de sels dissous, les courbes de pF traduisent le potentiel capillaire réel du sol.

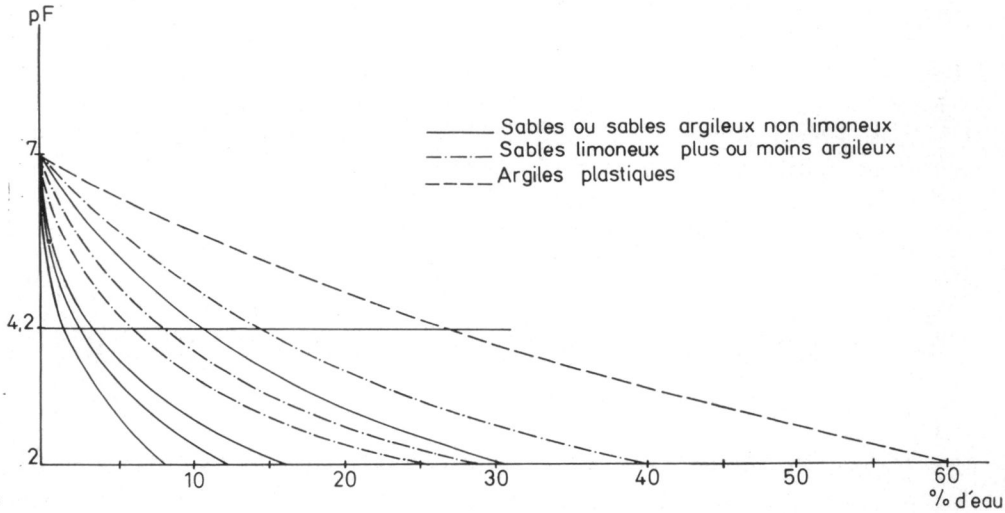


Fig. 34. — *Les différents types de courbes de pF*

Les 3 types de courbes rencontrées sont groupés sur la figure 34 : ils correspondent à 3 groupes de sols :

— *Les sols non limoneux,* sableux ou argileux jusqu'à 45 p. 100 d'argile. La courbe de pF, à l'échelle adoptée présente une courbure marquée ; sa tangente au

point pF 2 forme avec l'axe des abscisses un angle mesurable. Une variation d'humidité de plus de 5 p. 100 dans cette zone se traduit donc par une variation de pF non négligeable ;

— *les sols limoneux*, sableux ou argileux (jusqu'à 60 p. 100 d'argile) donnent des courbes à rayon de courbure plus grand que les précédents ; leur tangente au point pF 2 fait un angle presque nul avec la parallèle aux abscisses : une variation d'humidité de 5 p. 100 dans cette zone ne correspond pas ici à une variation notable de pF.

— *Les argiles plastiques* donnent des courbes qui tendent vers des droites. Les humidités aux basses tensions correspondent à des pF bien différenciés comme dans le premier cas.

Ces conclusions sont valables pour les types d'argiles étudiées sans permettre d'extrapolation ; elles tendent uniquement à faciliter la compréhension des calculs d'erreur et de l'importance des réserves utilisées dans les différents types de sols.

2° La capacité au champ

Elle correspond théoriquement à l'humidité du sol bien réhumecté et ressuyé. Dans la pratique, il ne peut être question de faire des mesures répétées systématiquement au cours de l'année sur les sols en place et l'on tend à les remplacer par des mesures de laboratoire dans des conditions de succion, de centrifugation ou de pression correspondant au potentiel capillaire observé à la capacité au champ : on se réfère généralement à l'humidité équivalente (pF 3) que l'on assortit d'une correction variable avec la granulométrie : dans les sols sableux, la capacité au champ correspond ainsi sensiblement à une pression de 1/3 d'atmosphère.

De telles mesures de laboratoire n'ont de sens que si le concept théorique de capacité au champ trouve ses conditions d'application dans le sol en place.

Nous allons rappeler brièvement ces conditions et rattacher ensuite la notion « pratique » de capacité au champ aux mesures de potentiels capillaires.

a) *La notion de capacité au champ.*

Nos études en Brenne ont permis de mettre en évidence deux points fondamentaux;

α) Le « ressuyage » nécessaire au concept même de capacité au champ est difficile à saisir : il exige souvent un temps très long et est sans rapport net avec l'écoulement des drains ; ceux-ci commencent à couler bien avant que le sol soit réhumecté lorsque l'on est en présence d'une perméabilité de fissure. Ils peuvent aussi cesser de couler bien que le sol reste gorgé d'eau, dans deux cas bien précis :

— dans certains sous-sols argileux, caractérisés par un fort retrait de l'argile ; la refermeture des fentes sous l'influence de la réhumectation bloque la circulation de l'eau ;

— dans certains horizons à structure très instable à l'eau, l'effondrement de la masse forme écran au-dessus d'un sous-sol qui peut rester sec. Dans ces conditions le débit des drains n'a plus de relation constante, au cours de l'hiver, avec la date et l'intensité des pluies, au point que sa mesure ne peut servir à repérer le « ressuyage ».

Autrement dit, la capacité au champ ne peut théoriquement jamais être définie dans de tels sols. C'est la raison pour laquelle on lui a donné dans les pages qui précèdent une définition conventionnelle d'application purement pratique : l'humidité autour de laquelle se maintient le sol en fin d'hiver en période de faible évapotranspiration.

Ce point correspond à un état relativement bien défini et reproductible au cours du temps, où le sol encore frais n'est plus plein d'eau ; cet état se maintient longtemps dans une sorte d'équilibre avec l'atmosphère jusqu'au moment où la dessiccation se déclanche brutalement ; il est donc assez bien repérable sur le terrain.

β) Cette « capacité au champ » telle qu'elle est définie ici reste liée, dans une certaine mesure, aux conditions particulières du moment ; elle dépend du tassement, de l'état structural, de l'occupation racinaire (voir l'exemple de La Plaine Ronde page : 127) ; Comme FEODOROFF l'a bien montré récemment (1961), le concept théorique n'est plus valable dans les sols instables.

On ne peut donc parler que d'un ordre de grandeur assorti d'un écart plus important pour les sols à structure instable à l'eau que pour les autres ; d'après nos mesures, l'erreur relative s'élève à plus ou moins 6 p. 100 dans les sols limoneux, plus ou moins 4 p. 100 dans les sables francs argileux et les argiles. La forme des courbes de pF, de pente plus faible pour les limons que pour les argiles, traduit cette différence de comportement aux basses pressions : dans cette zone, la marge d'erreur sur l'humidité donne des potentiels capillaires définis à 0,2 unité pF près dans les limons, et 0,15 unité dans les autres sols.

γ) La macroporosité est beaucoup plus faible en surface, dans les sols riches en limons que dans les autres sols ; ce type de sol est moins aéré que les autres lorsqu'il est encore humide. Or, comme l'ont montré KIRKHAM D., de BOODT M., et de LEENHER L. (1958) le degré d'aération peut devenir critique pour la plante à la capacité au champ précisément parce que cet état est prolongé.

Il est donc possible, dans le cas particulier des limons, que l'humidité à la capacité au champ telle que nous l'avons définie, soit « physiologiquement » un peu trop élevée. Seules des mesures tendant à préciser la composition de la phase gazeuse dans le sol en cours de ressuyage permettraient de la comparer aux besoins réels des plantes à différents stades de leur croissance.

b) *Le potentiel capillaire à la capacité au champ*

Une remarque préalable de principe paraît nécessaire avant de préciser les potentiels capillaires correspondant aux capacités au champ observées.

α) *Remarque préalable.*

On cherche ici à rapprocher la capacité au champ d'un potentiel capillaire défini sur les courbes de pF ; il s'agit uniquement de rattacher une mesure de terrain à un procédé de mesure bien standardisé de laboratoire. Il n'est nullement question de prétendre définir en même temps le potentiel capillaire réel du sol en place.

Non seulement on ignore, en fin d'hiver, si la réhumectation du sous-sol est totale et quelle est l'amplitude de l'hystérésis dans de tels horizons mais surtout on

touche ici au problème du rôle de la structure sur la rétention spécifique de l'eau par un sol. Pour les argiles, CHILDS, dès 1942, évaluait l'instabilité structurale des argiles du lias, d'après les différences de courbes de pF obtenues comparativement sur deux échantillons, l'un non remanié et l'autre malaxé avec de l'eau. Il reprenait avec YOUNG en 1958 l'étude du rôle de la brutalité de l'humectation sur la forme de la courbe. CRONEY et COLEMAN précisaient encore, en 1955, ce rôle du malaxage préalable des sols argileux et celui du tassement. Parallèlement CAMPBELL (1952) démontrait qu'à une même tension, l'humidité est plus élevée dans un sol à structure détruite par l'eau et le froid (puddled) que dans le même laissé dans son état initial. KUIPERS surtout a récemment montré (1961) que les mesures de pF en laboratoire n'étaient transposables au terrain que si le sol n'est pas trop compacté et si les agrégats ont une dimension supérieure à 2-3 mm. Or ces conditions sont loin d'être remplies dans le cas présent. Les mesures de laboratoire ne sont pas directement applicables sur le terrain sans interprétation.

β) *Le potentiel capillaire correspondant à la capacité au champ.*

Le potentiel capillaire correspondant à la capacité au champ observée, peut, avec les restrictions précédentes, être précisé ; il apparaît étroitement lié, au type granulométrique et, en l'absence d'argile, à la présence de matières organiques.

Le nombre de nos observations dans chaque type n'est pas suffisant pour permettre la recherche d'une corrélation statistique ; il permet toutefois de donner des indications valables qui confirment en partie des données relevées par ailleurs (COMBEAU A., 1960).

	pF correspondant à la capacité au champ
1) Sable fins (100 à 300 μ), moins de 10 % d'argile	
— horizon de surface 1,5 % mat. organ.	2,1 à 2,2
— horizon de sous-sol (peu profond) traces de mat. organ.	1,8 à 1,9
2) Sables grossiers (800 μ) contenant 15 à 25 % d'argile	2,3 à 2,5
3) Sables limoneux (40 à 50 % d'éléments compris entre 20 et 50 μ) contenant 10 à 30 % d'argile	2,7 à 2,8
4) Argiles de sous sols	
α) sous-sol détritique de transport, marmorisé, très grossièrement structuré en place (42 à 62 % d'argile)	2,8 à 3,1
β) argileplastique dérivée du cénomanien, assez finement polyédrique (80 % d'argile)	3,2 à 3,4

La capacité au champ correspond donc à de faibles tensions dans les sols de sables fins, très inférieures à 1/3 d'atmosphère. Elle est voisine de 1/3 d'atmosphère dans les sables francs argileux, et plus élevée en présence de limons. Nos données sont peu nombreuses pour les sables grossiers, elles semblent situer la capacité au champ aux environs d'un pF 2,1 à 2,2 (mesuré sur la terre fine). Quant aux argiles de sous-sols, elles apparaissent de comportement différent selon leur origine et leur nature. Les humidités mesurées en fin d'hiver peuvent correspondre à des pF très élevés.

3° L'EAU DISPONIBLE A UN NIVEAU DONNÉ

Si l'eau utilisée se déduit du profil hydrique, l'eau utilisable est proportionnelle à la différence des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent.

a) *Le point de flétrissement permanent*

Si la notion de capacité au champ est assez floue, le point de flétrissemement permanent est également arbitraire ; depuis longtemps, l'humidité à 15 atmosphères est considérée comme encadrant simplement le point de flétrissement biologique, étagé en fait entre 7 et 30 atmosphères (RICHARDS L. A., WEAVER L. R., 1944). Les études plus récentes (LEMEE M. G., 1959 ; HALLAIRE M., 1959) ont montré comment l'eau était utilisable par les plantes de part et d'autre de cette limite, variable en fait avec la plante et la vitesse instantanée de desséchement du sol.

Il est difficile d'encadrer les limites de variation de ce point puisqu'elles dépendent plus des conditions extérieures que du sol lui-même.

Ceci posé, on peut admettre que la différence H*c*-H*p* (H*p* : humidité à pF 4,2) est un indice valable de l'ordre de grandeur des réserves hydriques d'un sol.

b) *Humidité à pF 4,2 et capacité au champ*

La fig. 35 traduit la relation observée entre cette humidité à pF 4,2 et la capacité au champ précédemment définie.

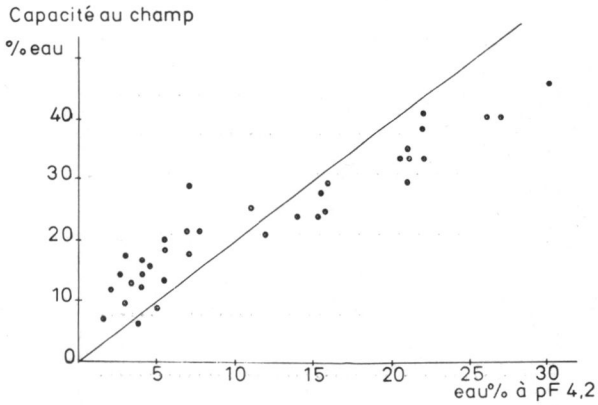


FIG. 35. — *Relation entre capacité au champ et point de flétrissement permanent pour différents sols*
(position par rapport à la droite Hp = Hc/2)

Si l'ensemble des points se groupent autour de la droite Hp = Hc/2, des localisations préférentielles dans certaines zones rendent inapplicable la loi statistique.

Pratiquement la relation existant entre Hp et Hc est étroitement subordonnée au type de sol :

sables fins (100 à 300 μ) purs ou peu argileux (10 % d'argile).....	$Hp = \frac{Hc}{5,5}$ à $\frac{Hc}{6}$
sables limoneux contenant 10 à 25 % d'argile, suivant limons	$Hp = \frac{Hc}{3}$ à $\frac{Hc}{4}$
sables « moyens » (500 à 800 μ) assez argileux (30 à 25 % d'argile)....	$Hp \# \frac{Hc}{2}$
argiles sableuses ou plastiques (sous-sol) (40 à 80 % d'argile)	$Hp \# \frac{Hc}{1,7}$ à $\frac{Hc}{1,5}$

Dans ce tableau, les sables grossiers, graveleux, purs ou argileux sont absents : la courbe de pF établie à partir de la terre fine peut difficilement être rattachée à l'humidité du sol en place qui contient de 15 à 45 p. 100 de graviers ou cailloux ; une correction systématique, faisant intervenir le taux de terre fine est apparue très arbitraire ; il semblerait grossièrement que Hp = Hc/4.

Quant à la matière organique des horizons de surface, elle a pour effet, dans ces sols, d'augmenter relativement plus Hc que Hp, d'où une différence Hc-Hp un peu plus élevée dans l'horizon superficiel que dans l'horizon A_2 sous-jacent de même texture.

Dans ces doubles conditions, la différence Hc-Hp qui sert de base à l'évaluation des réserves en eau disponible se trouve élargie dans les sables par rapport aux argiles, et cet élargissement se trouve accentué dans l'horizon superficiel humifié.

c) *La réserve disponible à un niveau donné*

Cette réserve, égale à (Hc-Hp) Δa, avec Δa = densité apparente, dépend donc du type de sol, dans les conditions précisées dans le tableau 25 ci-dessous :

TABLEAU 25

Texture	Hc-Hp (% d'eau)	Δa	(Hp-Hc) × Δa
Sables grossiers, graveleux.....	5 à 7	1,55	8 à 11
Sables fins purs, ou très peu argileux, humifiés.	11 à 12	1,35	15 à 16
Mêmes sables (horizon A_2)	9 à 10	1,60	15 à 16
Sables « moyens », assez argileux (20 à 25 % d'argile)	11 à 12	1,50	16 à 19
Sables limoneux, 10 à 18 % d'argile, suivant argile, limon et matière organique	13 à 20	à 1,60	20 à 32
Argiles sableuses détritiques 40 à 60 % d'argile.....	9 à 12	1,48	13 à 18
Argiles plastiques (suivant réhumectation)	11 à 14	1,22	13 à 17

Trois remarques se dégagent de ce tableau :

— La gamme d'humidité utile Hc-Hp, élargie dans les sables limoneux par rapport aux argiles, se trouve encore renforcée par une densité apparente plus élevée dans le 1er cas : au total, les argiles sont donc plus « sèches » que les limons ;

— Seuls les sables grossiers ont de faibles réserves, situation aggravée d'ailleurs par la rupture des films capillaires et l'impossibilité d'une « remontée » des couches profondes.

— Les sables fins purs, par contre, retiennent presque autant d'eau que des sables moyens assez argileux (sols francs, les meilleurs). Ils en retiennent à peine moins que les argiles de sous-sol, qu'elles soient détritiques ou très plastiques.

Dans ces conditions, l'intervalle d'humidité à l'intérieur duquel l'eau reste disponible (Hc-Hp) dans un profil constitué par des couches de granulométrie très différentes, varie moins d'un horizon à l'autre qu'on ne l'attendrait à priori. Les différences maxima rencontrées le long d'une verticale ne dépassent pas en valeur relative 1 à 1,4 pour des teneurs en argile passant de 8 à 50 p. 100. Cet écart maximum correspond aux sols limoneux, il est moindre en sols plus « francs ». Quant aux réserves « ponctuelles » maxima, elles se trouvent toujours dans l'horizon superficiel beaucoup plus sableux que dans les sous-sols argileux. Elles varient également peu d'un profil à l'autre, sauf dans le cas de sols graveleux nettement plus secs ou de sols très limoneux toujours plus humides.

Cela se traduit sur les profils hydriques par une translation presque parallèle du tracé entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au desséchement maximum, avec un intervalle souvent moindre en sous-sol argileux qu'en surface sableuse. Dans le calcul final des réserves totales disponibles à un niveau donné, l'intervention de la densité apparente (qui est une « densité sèche » , plus faible dans les argiles que dans les sables) ne tend qu'à minimiser encore la part contributive du sous-sol argileux, par rapport à celle de la surface sableuse.

Toutes ces remarques tendent à renforcer la conclusion d'ordre très général qui est la suivante : sauf dans le cas extrême de sols graveleux (ce qui exclut généralement les alluvions anciennes de rivière), les réserves totales réellement utilisables d'un sol dépendent infiniment plus de l'épaisseur de sol exploité — et exploitable — par la plante et des données climatiques instantanées, que de la nature du sol lui-même. Dans ces conditions, la détermination des caractéristiques Hp et Hc devient presque secondaire.

4° Les limites des mesures de potentiels capillaires dans les sols hétérogènes

Dans les pages qui précèdent, il a été question d'hétérogénéité verticale entre les différents horizons nettement différenciés d'un même profil et l'on a vu que les courbes de pF donnent une bonne compréhension des profils hydriques.

Deux autres cas d'hétérogénéité peuvent apporter une contribution aux études sur les mouvements de l'eau dans le sol :

a) *Une hétérogénéité à l'intérieur d'un même horizon*

Comme on l'a vu dans l'étude détaillée des différents profils hydriques, on trouve à un même niveau, tant qu'il s'agit du même « type » de dépôt, des humidités en place assez voisines se différenciant de moins de 10 p. 100 (voir page 277) malgré des granulométries et par conséquent des courbes de pF très différentes. A titre d'exemple, le tableau 26, ci-dessous, dégage les caractéristiques hydriques de deux prélèvements voisins.

TABLEAU 26

Caractéristiques de deux profils voisins en sol hétérogène

Profil	Profondeur	argile (%)	Humidité correspondant à	
			pF 2,7	pF 4,2
N° 1	0-25	19	14	7
	25-35	8	6,5	2,5
	35-50	11	8,5	4
N° 2	0-20	24,5	24	13
	20-35	20	23,5	12
	35-60	28	20	10

Les caractéristiques varient sommairement du simple au double entre les deux profils ; même si l'on tient compte du pourcentage différent de terre fine à un même niveau, les humidités en place, égales à moins de 10 p. 100 près, traduisent des pF très différents.

Autrement dit, il semble que l'on soit, à un moment donné et dans un horizon donné, à une humidité « moyenne » correspondant à un potentiel plus faible en zone sableuse qu'en zone argileuse. Cet état de fait ne semble que répéter d'ailleurs, à beaucoup plus petite échelle, ce qui existe entre les différents horizons d'un même profil ; le potentiel capillaire à la capacité au champ est plus faible dans les sables que dans les argiles. Mais localement cette micro-hétérogénéité des pF à l'intérieur d'un même horizon incite à penser que les mouvements d'eau dans le sol ne peuvent effectivement pas être commandés par les seules variations de ψ.

b) *Une hétérogénéité entre horizons différents imbriqués l'un dans l'autre*

Dans le cas de dépôts de nature très différentes, on a vu au contraire que les humidités en place ne dépendent que de la distance verticale du point étudié au niveau supérieur de l'argile (voir p. 283). Autrement dit, la variation verticale du pF dans l'argile se fait par bandes parallèles à la surface irrégulière de son affleurement, sans relation avec la surface du sol lui-même, c'est-à-dire que la plante trouve ici des force de rétention de l'eau semblables à des profondeurs variant de — 20 à — 60 cm et à l'opposé des forces très différentes à un même niveau.

Les deux types d'hérérogénéité rencontrées montrent à quel point la notion de potentiel capillaire peut être difficile à appliquer sur les sols en place.

5° Conclusions

Les pages qui précèdent ont permis de dégager les points suivants :

— le concept théorique de capacité au champ ne trouve pas son application dans les sols de structure instable à l'eau.

— dans de tels sols, il existe cependant un état d'équilibre entre le sol, l'eau et l'atmosphère qui correspond « pratiquement » à la notion de capacité au champ.

— Cet équilibre n'est défini qu'à 0,15 ou 0,2 unité pF près.

— Il correspond à une gamme de pF variable avec le type de sol : pF 2 dans les sables purs assez fins, 2,7 à 2,8 en présence de limons, 3 dans les argiles.

— L'humidité à pF 4,2 est dans un rapport étroit avec la capacité au champ précédemment définie, mais ce rapport est très variable d'un type de sol à l'autre, depuis 1/6 dans les sables fins purs à 1/1,5 dans les argiles fortes.

— De toutes ces remarques, on déduit que les réserves hydriques utilisables dans un sol dépendent infiniment plus de l'épaisseur de sol exploité et exploitable par la plante que des « caractéristiques hydriques » du sol lui-même.

B. — Comportement hydrique et stabilité de la structure

Comme on l'a vu dans les conclusions des études de détail sur le plan régional, la plus grosse difficulté en Brenne réside, en sols profonds, dans l'instabilité de la structure, liée à la nature détritique de la roche mère et entretenue par la submersion périodique prolongée.

L'instabilité de la structure occupe donc une place importante dans cette étude ; après quelques précisions indispensables sur la reproductibilité de la méthode elle-même, un paragraphe sommaire relie les résuitats des tests aux caractéristiques des sols. La 3ème partie, beaucoup plus conséquente, est consacrée aux rapports existant entre les valeurs des tests et le comportement in situ des sols : les différents niveaux d'instabilité dans le profil sont étudiés (horizon A_2 des sols d'apparence podzolique, surfaces battantes et argiles de sous-sol). Avant la conclusion d'ensemble, le problème de l'irrigation dans de tels sols est effleuré et quelques lignes sont consacrées à une discussion sur les déterminations des caractéristiques physiques classiques dans ce type de sols.

1° Reproductibilité des tests d'instabilité structurale

L'intervalle de variations de l'indice S dans les sols étudiés est trop étroit — de 0,16 à 13 — pour qu'il soit intéressant de faire appel à son logarithme qui rétrécit trop l'étalement des chiffres. L'indice K varie dans les mêmes conditions de 40 à 0,01. Mais si l'on utilise les chiffres S et K eux-mêmes, la reproductibilité de la méthode entre deux mesures successives et 2 prélèvements voisins, devient un point fondamental.

De multiples essais, en dehors des précautions de manipulations signalées par les auteurs eux-mêmes, ont abouti aux conclusions suivantes :

a) *Reproductibilité des manipulations*

Le tableau 27 précise, pour les tests de perméabilité, l'importance de l'erreur absolue : elle est insignifiante. Pour l'indice S, elle peut atteindre 0,5 unité pour les valeurs de $S > 4$; elle vient surtout de la détermination du taux (A + L) : elle ne gêne pas l'interprétation des résultats.

b) *Importance du prélèvement*

Le prélèvement doit être important ; des variations sensibles existent à l'intérieur d'une même fosse d'un point à un autre du même horizon. L'échantillonnage doit donc être le plus « moyen » possible, à la condition toutefois de respecter l'hétérogénéité macroscopique.

Les écarts observés entre 2 points voisins sont plus importants sur K que sur S, et relativement plus forts pour les perméabilités élevées que pour les perméabilités faibles (écarts maxima observés de 30 p. 100 pour $K > 8$ et de 12 p. 100 pour $K < 3$) L'interprétation finale n'est donc pas faussée de façon très grave.

c) *Préparation de l'échantillon*

Il peut exister des variations substantielles d'une motte à l'autre (K variant de 1 à 3) ; l'échantillon prélevé (plus de 1 kg) doit donc être préparé au tamis à maille carrée *dans sa totalité.*

d) *Évolution des échantillons préparés.*

Les échantillons préparés subissent une évolution au cours de leur conservation à l'état sec, dans le sens d'une amélioration de la stabilité structurale. PAYNE, en 1956, avait d'ailleurs fait la même remarque et montré que la stabilité dépend de l'humidité de l'échantillon au moment du prélèvement.

Quelques exemples montrent (tableau 27) l'évolution du test K sur des échantillons préparés et conservés secs (en boîte cartonnée) pendant un an.

TABLEAU 27

Évolution de l'indice K *au cours de la conservation d'un échantillon*

Profil	Profondeur	Après préparation	Un an plus tard
N° 1			
	0-10	2,4 ± 0,2	3,0 ± 0
	20-40	0,6 ± 0	1,05 ± 0,05
	40-60	2,8 ± 0,3	4,15 ± 0,15
N° 2			
	0-10	1,4 ± 0	2,8 ± 0,1
	22-52	4,8 ± 0,4	6,7 ± 0,2
	52-70	2,25 ± 0,15	3,0 ± 0,4

Ce problème des conditions optima de conservation des échantillons de terre sèche reste à préciser.

e) *Évolution de la stabilité in situ au cours de l'année.*

Les résultats des tests peuvent varier considérablement avec l'époque de l'année à laquelle se trouve fait le prélèvement. Cette constatation a été faite depuis longtemps (HÉNIN TURC, 1953) et confirmée plus récemment (TOTH, ALDERFER, 1960 ; PAYNE,

1956). Maximum en été, (1) la stabilité diminue à l'automne et au printemps. Une étude préalable de ces variations au cours de l'année était donc indispensable : le tableau 28 en fournit 2 exemples. Comme ne le voit, l'indice S subit une variation plus importante que K.

TABLEAU 28

Variation des indices S et K au cours de l'année

Profils	S	K	S	K	S	K
	7 octobre		*13 octobre*		*12 janvier*	
N° 1						
0-10	1,16	1,7	4,1	1,05		
10-30	1,8	2,3	2,9	1,2		
30-45	4,1	0,4	4,2	0,45	4,6	0,17
N° 2						
0-30	0,6	3,4	1,9	1,85		
30-58	4	0,4	5,0	0,3		
58-70	5,9	0,37	13	0,09		

Le premier sol correspond à une culture de plante sarclée que l'on venait de récolter le 7 octobre et qui a subi immédiatement des pluies importantes ; six jours plus tard, la détérioration de la structure sur sol nu se répercute sur la valeur des indices. La deuxième correspond par contre à une prairie ; malgré cette couverture la différence est sensible entre le moment de sécheresse maximum et le début de la période pluvieuse.

En conséquence, si l'on veut que les résultats des tests soient comparables, il faut se placer à une époque déterminée, par rapport aux périodes de pluie. La comparaison entre deux périodes différentes semblerait même pouvoir constituer un test supplémentaire.

Les chiffres qui sont fournis dans ce texte correspondent à des prélèvements faits en période sèche lorsque le point de flétrissement permanent vient d'être atteint dans la couche superficielle.

2° Stabilité structurale et caractéristiques des sols

Des comparaisons entre les valeurs des tests et les différentes composantes des sols (Mme Meriaux, 1958 ; Combeau, 1960) n'ont pas été refaites systématiquement. Il a simplement été confirmé quelques points fondamentaux et recherché les relations existant entre ces indices et l'évolution du comportement sous l'influence de techniques culturales.

a) *Granulométrie*

A égalité de teneur en matières organiques et sous même culture, il n'y a pas de relation entre les valeurs des tests et le taux d'argile. L'influence des limons par contre

(1) D'études très récentes, il ressort que le maximum de stabilité est atteint en début de sécheresse (juin). L'aridité prolongée de l'été diminue cette stabilité (Maertens, Station de Châteauroux, communication personnelle, non publiée).

est prépondérante pour accuser l'instabilité de l'horizon, davantage d'ailleurs sur S que sur K (tableau 29).

TABLEAU 29

Test d'instabilité et granulométrie

Argile (%)	Limons + sables très fins	S	K
6	8	0,3	5,15
5	12	4,13	0,4
26	7	0,97	5,5
12	17	0,5	5,7
12	55	3,1	1,5

b) *Matière organique*

Les agrégats stables après prétraitement benzène traduisent l'influence stabilisante de la matière organique.

Dans les horizons de surface.

Deux cas particuliers sont à noter :

— *En présence de limons*, un enrichissement en matière organique augmente la stabilité et améliore effectivement la structure en place,

— *Dans les vieux pacages*, la richesse naturelle en matière organique donne des sols « stables », mais il s'agit ici d'une matière organique peu favorable à la végétation (C/N = 17). Le retournement de la prairie est suivi immédiatement d'un décalage des indices vers l'instabilité (tableau 30).

TABLEAU 30

Évolution des indices d'instabilité sous pacage retourné

	S	K
Sous vieux pré avant retournement	0,24	4,35
3 mois après retournement (sol laissé nu)	2,3	1,6
1 ans après retournement et culture de plante sarclée	4,1	1,04

Il est difficile de dire ici si cette « détérioration » est aussi accusée sur le terrain que l'évolution des indices le laisserait supposer ; en fait, il s'y associe étroitement une évolution parallèle de la matière organique vers des formes moins carbonées.

Pratiquement, dans une étude de sol destiné à être mis en culture, il convient de ne pas tenir compte de la stabilité « apparente » uniquement « actuelle » de la couche végétale sous vieux pacage. Il faut simplement avoir à l'esprit que la végétation actuelle protège le sol et doit de préférence être laissée en place pour l'exécution des travaux de drainage.

Dans les argiles de sous-sols.

Les taux d'agrégats stables, après prétraitement benzène, mettent en évidence la pauvreté en matière organique des argiles de sous-sols à la condition toutefois de tenir compte du pourcentage variable de sables grossiers qui entrent dans la constitution de l'horizon argileux. Avec cette correction, toutes les argiles étudiées, quelles qu'elles soient, ont une stabilité nulle après immersion dans le benzène ; c'est ce facteur qui intervient pour relever l'indice S au-dessus de 1 même lorsqu'il n'y a aucune dispersion de l'argile dans les conditions naturelles.

La stabilité à l'eau sans prétraitement (corrigée du pourcentage de sables grossiers) distingue par contre nettement les différents comportements sur le terrain.

La comparaison de ces agrégats « sans prétraitement » et des agrégats alcool reste très instructive et complète la remarque précédente : les 2 taux d'agrégats restent voisins dans les sables et les argiles « stables » ne se dispersant pas dans l'eau pure ; les agrégats alcool sont par contre très supérieurs aux autres dans le cas contraire (sous-sols du centre Brenne, même protégés par de la matière organique et les limons).

c) *Autres facteurs*

La stabilité des sols calcaires, ou tout au moins saturés en ion Ca, a été confirmée dans les horizons superficiels. Par contre, en sous-sol où le taux de saturation s'échelonne entre 50 et 90 p. 100, les stabilités sont variables, sans relation apparente avec les taux de saturation.

Les autres facteurs de la stabilité n'ont pas été systématiquement recherchés (hydroxydes, sables, nature exacte de l'argile, nature et forme de dépôt de la matière organique existante, etc.). On peut toutefois noter que les argiles de Brenne ne contenant pas d'aluminium libre sont les moins stables.

3° Stabilité structurale et comportement des sols in situ

a) *Sols d'apparence podzolique*

α) *Degré de dégradation par l'hydromorphie.*

Une étroite relation a été constatée systématiquement entre la valeur de ces indices et le degré de dégradation de l'horizon A_2 blanchi des sols podzoliques hydromorphes.

Ce degré de dégradation est jugé qualitativement d'après l'aspect du profil cultural : structure plus ou moins cimentée, plus ou moins variable d'une saison à l'autre, enracinement plus ou moins déficient et « anormal », compte tenu de l'espèce cultivée, absence plus ou moins totale de vers de terre. Corrélativement des différences sensibles de comportement en période pluvieuse apparaissent.

L'importance relative des concrétions ferrugineuses et des marbrures est par contre sans relation avec ce comportement : elle ne dépend en fait que de la richesse en fer de la roche mère et accessoirement du relief. Seule la première catégorie de critères est donc conservée et sert de base à la classification suivante, purement qualitative :

— les sols peu dégradés,
— les sols dégradés,
— les sols très dégradés,

Une relation étroite existe entre cette classification et la valeur des indices d'instabilité structurale.

Sur un même profil.

C'est l'horizon intermédiaire « blanchi » d'apparence podzolique qui apparaît le plus dégradé ; malgré sa prédominance sableuse, il se comporte comme un horizon imperméable et limite l'efficacité d'un réseau de drainage. C'est lui qui fait obstacle à l'enracinement et à l'approfondissement radiculaire jusqu'à l'argile. Celle-ci, mal exploitée, mais protégée par des enracinements anciens, est stable in situ et présente une perméabilité de fissure élevée.

Les tests d'instabilité structurale reflètent ces différences de comportement entre les horizons d'un même profil (tableau 31).

TABLEAU 31

Profil de sol dégradé par l'hydromorphie

Profondeur	0-25	25-55	55-70
% argile	9	10	42
% limon	6	7	4
% matière organique	1,7	0,5	0,5
Indice S.....	0,62	4,0	2,1
Test K	3,4	0,4	1,3

C'est bien l'horizon intermédiaire « blanchi » qui présente les caractères accusés d'instabilité.

Entre profils différents.

Il apparaît une relation étroite entre la classification qualitative de l'hydromorphie proposée ci-dessus et la valeur des tests d'instabilité.

Le tableau 32 donne quelques exemples choisis dans la plus large gamme possible de sols : il s'agit partout d'horizons « blanchis ».

TABLEAU 32

Tests d'instabilité structurale et degré de dégradation de l'horizon hydromorphe

	Argile %	Limon %	Indice	
			S	K
Très dégradé	8	13	4,3	0,2
	18	12	3,2	0,3
	19	23	5,0	0,5
	12	22	4,1	0,4
Dégradé	23	25	3,3	1,3
	18	28	3,3	1,45
	22	12	2,62	1,5
	34	24	1,52	1,74
Peu dégradé	37	15	1,26	1,65
	18	22	1,28	1,57
	10	2	1,0	3,6

Les tests d'instabilité apparaissent comme une expression quantitative du degré de dégradation de l'horizon, en relation immédiate, comme on l'a vu, avec la perméabilité totale de l'ensemble du profil et les difficultés de pénétration radiculaire.

Dans les secteurs où le drainage est inefficace, l'horizon d'apparence podzolique très dégradé, a un indice S de 4 à 5 et un test de perméabilité très faible, K = 0,2 à 0,4.

Dans les secteurs qui réagissent favorablement, l'indice S est à peine supérieur à 1 et K dépasse 1,5.

Cette constatation est fondamentale pour une étude préalable à un aménagement hydraulique.

β) *Évolution de la structure.*

La mise en valeur de sols suppose que les sols les plus dégradés soient susceptibles d'une évolution dans un sens d'amélioration de leur structure.

Les séries de mesures effectuées dans le cadre de nos champs d'essai permettent de déceler une relation effective entre l'évolution constatée in situ et l'évolution des résultats des tests.

— *Cas où aucune amélioration n'a été obtenue.*

Dans un secteur particulièrement défavorable (La Claise p. 287) sous une nouvelle prairie mal réussie, on aboutit 2 ans après drainage au maintien du profil dans son état primitif : enracinement pratiquement nul en A_2, et corrélativement inefficacité des drains.

TABLEAU 33

Tests d'instabilité structurale sur profil non amélioré

	A l'origine	Deux ans après drainage
Horizon superficiel		
Indice S	1,93	0,96
Test K	1,7	17,5
Horizon hydromorphe		
Indice S	4,13	4,15
Test K	0,4	0,2
Argile sous-sol		
Indice S	2,1	2,55
Test K	1,3	1,8

Les tests d'instabilité struturale dépistent l'enrichissement en matière organique de l'horizon superficiel, mais l'absence presque totale d'évolution de la zône hydromorphe et de l'argile sous-jacente (tableau 33).

— *Cas où une amélioration nette a été obtenue.*

Dans un autre (la plaine Ronde p. 301) secteur, deux ans après drainage, recalcification, fumure organique, et installation d'une prairie temporaire convenable (10 t de M.S, la 2e année) le terrain qui se ressuyait encore très mal en première année, reste sain l'année suivante malgré l'automne très pluvieux, (1960-61). Parallèlement, l'horizon blanchi totalement inexploité à l'origine, est assez bien occupé au bout de 2 ans. L'argile

sous-jacenteacquiert une structure plusfine , à tendance polyédrique, se dessèche et se réhumecte ; de véritables « nids » de vers de terre sont trouvés à — 60 cm.

Les tests d'instabilité structurale, à 2 ans d'intervalle, sont les suivants (tableau 34) :

TABLEAU 34

Tests d'instabilité sur profil amélioré

	A l'origine	Deux ans après drainage
Horizon superficiel		
Indice S.....	1,19	0,8
Test K.....	1,9	7,2
Horizon hydromorphe		
Indice S.....	4,1	2,6
Test K.....	0,4	1,5
Argile sous-sol		
Indice S.....	2,1	1,18
Test K.....	1,3	11,5

L'horizon hydromorphe « très dégradé » au départ, passe dans la catégorie « dégradée ». L'évolution de l'argile est substantielle : tests et observations sont dans la même ligne.

— *Évolution comparée sous techniques culturales différentes.*

Le problème dans de tels sols consiste, comme on l'a vu, à chercher les techniques susceptibles d'accélérer le rythme d'évolution. Aucun résultat définitif ne peut être donné encore ici, puisqu'il s'agit d'essais en cours, de longue durée, réalisés sur le terrain.

Il est possible toutefois de relier les résultats des tests aux observations faites sur profil au bout d'un an de cultures différenciées.

Sur sol riche en limons, d'apparence podzolique et très dégradé (La Plaine Ronde, page : 301), 2 types très différents de prairie ont été implantés dans des conditions optima, par semis de printemps, 1 an après drainage :

— une luzerne (du Poitou) dactyle,

— un trèfle blanc-fétuque des prés.

Les deux espèces de légumineuses, à types d'enracinement différents et sensibilité hydrique également très différente, accusent des rythmes de croissance distincts qui se répercutent sur l'occupation racinaire du profil à une même période.

Des comparaisons ont pu être faites à des époques correspondant à des stades de développement différents chez les deux plantes.

— *Année du semis* (printemps très sec)

Seule la luzerne donne une production (d'ailleurs faible). A l'automne, ses pivots atteignent nettement l'argile, qu'ils ont partiellement desséchée. Le trèfle, par contre n'a pas exploité le sous-sol.

— *Printemps de l'année suivante.*

La luzerne, gênée par un ressuyage encore trop lent du sol malgré le drainage, a son pivot pourri ; sans fumure, la première coupe en juin est très médiocre, le profil a peu évolué par rapport à l'année précédente.

Le trèfle par contre a bénéficié des pluies et permet une coupe susbtantielle en mai ; le profil est beaucoup plus exploité jusqu'à l'argile que sous luzerne.

— *Eté suivant* (très sec)

Le trèfle est complètement stoppé.

La luzerne-dactyle, aidée par une fumure azotée et potassique reprend vigueur et fournit 4 coupes.

Les tests d'instabilité structurale ont donné les résultats suivants :

Avant l'implantation des prairies.

	Indice S	Test K
Horizon superficiel	1,19	1,92
Horizon hydromorphe	4,1	0,42
Argile sous-sol	2,06	1,31

Ce sol fait partie du type « très dégradé ».

En fin de printemps, l'année suivante.

Avant la reprise de vigueur de la luzerne, les 2 prairies se différencient nettement :

	trèfle-fétuque	*luzerne-dactyle*
Horizon superficiel		
Indice S	0,75	1,22
Test K	12,7	6,8
Horizon hydromorphe		
Indice S	2,11	3,83
Test K	1,15	1,05
Argile sous-sol		
Indice S	1,75	1,52
Test K	4,95	5,8

On constate sur ces chiffres que l'amélioration des deux premiers horizons est effectivement plus nette sous trèfle-fétuque que sous luzerne-dactyle, à système radiculaire plus pivotant et moins développé après l'ennoyage d'hiver. Tests et observations du profil marquent bien la même tendance.

Ces premières observations confirmeraient l'efficacité plus grande du trèfle-fétuque que de la luzerne-dactyle sur l'amélioration de la structure (MONNIER G., 1957). Mais l'évolution ultérieure est en faveur de la luzerne et conforme à des résultats obtenus à l'étranger (JURAN, 1960). Les rythmes de croissance et les besoins différents des 2 plantes peuvent expliquer des divergences d'opinion à ce sujet. Des rythmes d'exploitation différents peuvent également jouer (MONNIER G., 1958). Dans le cas présent qui nous intéresse, seule la poursuite des essais en cours peut permettre une opinion valable et définitive.

b) *Sols à tendance battante*

L'instabilité superficielle est accessoire dans le cas présent, en ce sens qu'elle pose simplement le problème classique de la battance.

La composition granulométrique des sols les plus mauvais sous cet aspect est d'ailleurs telle que ce défaut de battance n'est pas poussé à l'extrême et est solutionné par le choix d'un assolement adapté.

Ce point ne nécessite pas de développement important ici. Deux détails toutefois méritent d'être notés dans le cadre de ce chapitre consacré aux relations existant entre les tests et le comportement in situ.

α) *Valeurs des tests.*

Comme pour les horizons « blanchis », il existe bien une certaine gamme de valeurs de S et K correspondant à des comportements hydriques plus ou moins déficients. Mais on n'a ici que deux grandes classes, trop lâches pour être véritablement utiles :

$S < 1$ et $K > 3$ sols stables, sans limons.

$S > 1$ et $K < 3$ sols plus ou moins stables, plus ou moins riches en limons.

On est en fait sous l'étroite dépendance du mode de culture et de la richesse en matière organique, au point que les vieux pacages ne rentrent pas dans cette classification : comme on l'a vu précédemment, la mauvaise matière organique gleyifiée des vieux prés pleins de joncs donne une apparence de stabilité ($S = 0{,}2$, $K = 4$) qui peut correspondre, sur le terrain, à une imperméabilité presque totale (vraisemblablement par excès de compacité.)

Ce cas mis à part, la classification précédente reste valable. Les valeurs correspondant au maximum d'instabilité rencontré sont de 3 pour l'indice S, et 1,5 pour K ; elles ne correspondent pas à des sols très mauvais, ce qui explique le caractère secondaire en Brenne de l'instabilité superficielle et le manque d'intérêt d'une classification des sols étudiés d'après les valeurs des tests.

β) *Évolution parallèle du comportement et de la valeur des tests.*

Pour un sol donné, à tendance battante, l'effet défavorable d'un travail poussé du sol se répercute sur la valeur des tests ; un seul exemple est donné ici (tableau 35).

TABLEAU 35

Détérioration de la structure superficielle par le travail du sol

État du sol	Indices	
	S	K
Sous prairie temporaire de 2 ans .	1,2	1,9
Guéret travaillé depuis 3 mois....	2,1	1,7

Ces résultats sont classiques. Notons ici la difficulté pratique à concilier le respect d'une structure péniblement acquise et la nécessité de nettoyer des sols particulièrement sales envahis par une végétation de graminées adventices pérennes.

c) *Cas des argiles de sous-sol*

On a constaté en Brenne 2 types de comportement différents des horizons argileux de sous-sol.

α) *le premier* se présente sous une structure très grossière, avec des mottes sensiblement cubiques, de plus de 10 cm de côté, compactes et tapissées extérieurement d'un matelas de racines non décomposées de l'ancienne végétation adaptée à l'hydromorphie.

Ces argiles sont sableuses (30 à 40 p. 100 de sables plus ou moins grossiers) et marmorisées ; elles sont surtout kaoliniques et présentent un faible retrait. L'ancien enracinement maintient une perméabilité de fissure non négligeable et sensiblement constante au cours du temps.

Les tests de stabilité structurale sur échantillon remanié décèlent en fait une instabilité : les microagrégats artificiellement constitués par la préparation ne sont plus protégés par la matière organique en place ; la dispersabilité de l'intérieur de la motte est bien mise en évidence et les eaux de percolation du test K coulent troubles. Mais cette dispersion n'existe pas sur le terrain.

Dans de tels sols, une manipulation sur motte entière complèterait l'interprétation ; elle pose évidemment le problème de la mise au point préalable des conditions de calibrage et de tamisage.

β) *le deuxième type d'argile* correspond à une argile plastique, géologique, à structure beaucoup plus fine que la précédente (mottes de 1 cm) et polyédrique.

Cette argile est caractérisée physiquement par son fort retrait.

En place, elle présente donc une perméabilité de fissure élevée après la dessiccation de l'été, et un réseau de drainage évacue rapidement les premières pluies comme s'il s'agissait d'un sable grossier. Mais cette argile se gonfle progressivement sous l'influence de la réhumectation et arrive à devenir totalement imperméable en fin de période pluvieuse prolongée. Ces sols incultivables présentent un enracinement très faible dans l'argile.

Les tests d'instabilité, tels qu'ils sont appliqués, dépistent mal un tel comportement :

— l'indice S n'est pas très bon (1,6 à 1,9), relevé par un taux d'agrégats stables après prétraitement benzène pratiquement nul ; l'analyse confirme l'absence de matière organique, le défaut d'enracinement.

— le test K donne par contre un chiffre apparemment correct (K = 1,7 à 3,0), les eaux de percolation sont bien limpides.

Par analogie aux horizons blanchis, le drainage devrait être convenable, ce qui n'est pas le cas.

Un complément de manipulation permet de déceler ce comportement particulier ; par simple percolation plus longue du test de perméabilité, le tracé de la courbe $K\ f\ (t)$ décèle une chute brutale et rapide de K au cours des 3 à 6 premières heures et un équilibre qui n'est pas encore atteint en 4 jours (tableau 36).

TABLEAU 36

Variation de K *en fonction du temps de percolation*

Temps	K	
	Échantillon n° 2 *	Échantillon n° 3 *
1re heure	2,4	3,6
2e heure	1,6	2,1
3e heure	1,3	1,7
4e heure	1,2	1,5
24e heure	0,7	0,8
7e jour	0,33	0,41

(*) Prélèvements voisins du même horizon

Comme on peut le constater d'ailleurs, les différences qui peuvent exister d'un point à un autre du terrain s'atténuent avec le temps et le comportement devient homogène.

Cette chute de perméabilité se rencontre sur la plupart des horizons argileux mais avec une intensité beaucoup plus faible.

On peut rapprocher cette remarque du principe même de mesure de K appliqué aux prélèvements Vergières dont il a été question précédemment : une première lecture est faite en début de percolation (K) et une seconde après 3 heures (K2).

Les auteurs de la méthode des tests (Hénin et *al.*) préconisent d'ailleurs également de prolonger le temps de percolation et de réserver son jugement lorsque K diminue de plus de 40 p. 100 en 2 heures. Mais ce n'est qu'une simple remarque qui n'apparaît pas essentielle et est attribuée au remaniement de l'échantillon au cours de l'imbibition.

Le test de percolation prolongé paraît en fait indispensable ; s'il peut refléter un bouleversement interne de la colonne de terre, il semble bien rendre compte de l'« imperméabilisation » progressive au cours du temps du profil correspondant en place.

4° Stabilité structurale et irrigation

Il est normal, dans le cas de « sols secs », de songer aux possibilité éventuelles d'irrigation, surtout dans un pays où des réserves naturelles existent sous forme d'étangs qu'il suffirait d'aménager.

Mais les sols posent un double problème : celui de la technique à prévoir et celui de l'effet de l'irrigation sur la structure elle-même.

Les études sont de trop longue haleine pour permettre des résultats déjà définitifs. Toutefois, l'orientation est suffisamment dégagée et une première mise au point paraît dès à présent constructive.

a) *Instabilité et technique d'irrigation.*

Dans de tels sols et en présence de quantités d'eau malgré tout limitées, seule l'aspersion est envisagée.

Mais en dehors des problèmes classiques de doses et de rythmes d'arrosage dans des sols à faibles réserves, celui de la pluviométrie horaire à prévoir n'est pas à négliger dans des sols instables.

Une étude préalable sommaire a été amorcée en laboratoire pour essayer de saisir une éventuelle relation entre les tests d'instabilité et le comportement de petits profils reconstitués à partir des échantillons préparés pour ces tests.

Deux intensités pluviométriques différentes, 3 et 10 mm /heure ont été appliqueés à des colonnes de sols secs reconstitués dans des tubes calibrés du test-HÉNIN ; les remplissages par le même poids de terre réalisaient pour chaque type 3 degrés de tassements différents ; la surface de ces colonnes était protégée de l'action mécanique ultérieure des gouttes d'eau par un tampon adhérent d'ouate hydrophile humidifiée.

L'essai consistait à suivre, à partir du temps 0 du début de l'arrosage, la formation plus ou moins rapide d'une nappe d'eau en charge et, parallèlement, la saturation du profil. Cette saturation était appréciée par l'apparition d'un drainage à la base du tube — ce qui correspond en fait à une sursaturation. Elle est évidemment liée à la pluviométrie horaire et à la capacité d'absorption du profil, différente d'un sol à l'autre.

TABLEAU 37

Essais de perméabilité en sols secs (profils reconstitués)

Sol	Indices		Tassement (1)	pour P = 10 mm/h			pour P = 3 mm/h			Capacité au champ (%)
	S	K		Nappe en charge (minutes) (2)	Saturation du profil (minutes)	Eau retenue %	Nappe en charge (minutes)	Saturation du profil (minutes)	Eau retenue (%)	
Sols 1 .	0,51	5,7	nt	—	20	32,2	—	70	32,7	18
			T	90	20	32	—	55	32,7	
2 .	0,7	4,6	nt	15	15	25	—	60	23	15
			T	10	25	19,6	30	45	18,4	
3 .	1,26	2,1	nt	60	20	36,7	—	75	36,5	21
			T	8	50	32,8	25	85	31	
4 .	1,0	2,4	nt	20	20	—	—	75		18
			T	5	75		20	120		
Sous-sols 5 .	1,0	2,7	nt	—	15	23,4	—	60	23,3	10
			T	5	25	18,2	45	45	17	
6 .	4,1	0,4	nt	5	20	21,6	105	50	20,8	11
			T	2	70	16,5	10	105	16	

(1) T = tassé (d = 1,6) — nt = non tassé (d = 1,3).
(2) — = pas d'ennoyage au cours de l'essai (3 heures).
Origine des nos de sols.
N° 1 — La Prêle voir page 278.
N° 2 — Claise type *a*, voir page 291.
Ne 3 — La Bertellerie, voir page 292.
N° 4 — La Plaine Ronde, voir page 298.
N° 5 et 6 — horizons A_2 de Claise, types *a* et *c* (p. 291 et 287).

Le tableau 37 présente les résultats obtenus pour 4 sols très différents et 2 horizons A_2 semblables par leur granulométrie mais différenciés par leur degré de

dégradation. Deux tassements seulement sont notés ici, correspondant aux densités apparentes de 1,6 et 1,3. Les indices S et K sont rappelés. Les chiffres indiqués pour les 2 pluviométries représentent le temps nécessaire à la formation d'une nappe en charge et d'un début de drainage. Le pourcentage d'eau retenue par le profil après arrosage et ressuyage à l'air libre pendant 24 heures est également indiqué. Cette quantité est évidemment très supérieure à la capacité au champ (donnée en dernière colonne à titre indicatif).

L'examen de ce tableau dégage l'importance respective du tassement et de l'intensité de la pluie sous trois aspects principaux :

1. *La formation de la nappe perchée.* — Elle est favorisée par le tassement, d'autant plus que le sol est moins perméable. Il y a interaction entre tassement et pluviométrie horaire ; en sol peu stable, l'effet du tassement est d'autant plus sensible que la pluviométrie est plus forte (sol limoneux n° 3). A la limite, en sol particulièrement instable, seule une pluviométrie très faible sur sol « aéré » permet une certaine circulation d'eau avant colmatage total (sous-sol n° 6).

2. *Les possibilités de drainage.* — Elles sont diminuées par le tassement en sol stable au point qu'il peut y avoir formation d'une nappe perchée bien avant apparition du drainage.

Pour les sols de comportement moyen il apparaît une « pluviométrie horaire-limite » en dessous de laquelle la perméabilité s'accroît par tassement et au-delà de laquelle elle est au contraire diminuée (n° 2 et 5) ; à la limite, l'effet du tassement tend à s'annuler (n°3).

3. *La rétention de l'eau après une pluie.*— Elle est évidemment liée au tassement par le volume plus ou moins grand des pores accessibles à l'eau. Mais pour un tassement donné, elle tend à être plus faible pour les pluviométries douces que pour les pluviométries fortes ayant provoqué un engorgement du profil avant la fin de l'essai. Autrement dit, un engorgement du profil par destruction de la structure sous l'influence d'un excès d'eau instantané, a pour conséquence un ressuyage ultérieur plus difficile. On ne fait ici que reproduire en en décomposant les facteurs, ce qui a été observé sur le terrain.

Ces essais, restés trop sommaires et incomplets viennent compléter les résultats obtenus par ailleurs (Feodoroff, 1961). Ils n'ont pas porté sur un nombre suffisant de sols pour permettre de déduire une corrélation entre les indices d'instabilité structurale — qui traduisent un comportement en période humide — et un test de comportement à l'eau en période sèche. Ils constituent, toutefois, une hypothèse de travail constructive.

Transposés sur le terrain, quelques essais préalables d'irrigation ont montré dans le cas particulier des sols ou sous-sol 2-5 et 6 du tableau précédent, qu'une pluviométrie horaire réduite de 3 mm arrive effectivement à engorger le sol en 4 à 6 heures, pour une dose totale encore faible.

Dans le domaine de l'application pratique, ces essais amènent à penser que la conduite d'une irrigation en sol instable à l'eau n'est peut-être pas aussi simple qu'ailleurs ; en dehors des problèmes de doses et de rythme des apports, il doit y avoir un problème de pluviométrie horaire optima à ne pas dépasser si l'on veut obtenir une pénétration normale de la pluie.

b) *Effet de l'irrigation sur l'amélioration de la structure*

Une irrigation sur maïs a été menée en 1961, dans le sol le plus difficile, sol d'apparence podzolique où le drainage est un échec et l'horizon A_2 reste inexploité (voir page : 115, sol n° 2-5-6 du tableau précédent).

Six irrigations seulement de 20 mm chacune au cours de l'été (dose très éloignée de l'évapotranspiration potentielle) ont permis les résultats suivants :

— un rendement très supérieur en zone irriguée, malgré le faible apport d'eau (80 q de maïs grain contre 20 en secteur non irrigué) ;

— le développement radiculaire du maïs dans l'horizon A2 et la pénétration nette dans l'argile sous-jacente. Cette différence d'enracinement entre les 2 secteurs irrigués et non irrigué explique l'efficacité inattendue de doses faibles.

L'irrigation a donc permis le développement des racines en profondeur, la première « colonisation » de l'horizon blanchi hydromorphe. La sécheresse apparaît ici comme le principal facteur limitant de la croissance végétale ; par sa suppression, le premier objectif poursuivi pour l'amélioration de la structure de l'horizon dégradé est atteint.

Ces résultats sont à rapprocher d'autres, négatifs, obtenus par ailleurs : l'absence totale de développement en profondeur d'un ray-grass d'Italie semé au printemps 1961 qui a précédé un été sec et l'inefficacité totale de localisations d'engrais à -35 cm sous cette graminée, pourtant connue pour sa puissance végétative.

Sous réserve de confirmation par la poursuite des expériences actuelles, l'irrigation apparaît donc comme une technique complémentaire de mise en valeur, avant d'être un moyen de production.

5° Stabilité structurale et caractéristiques physiques classiques des sols

a) *Rétention de l'eau*

Des mesures préalables de « capacité de rétention » par succion sous dépression contrôlée jusqu'à équilibre (type Bouyoucos) ont mis en évidence la variabilité des résultats obtenus sur de tels sols, dans une gamme de chiffres toujours supérieurs à « la capacité au champ » observée sur le terrain : dans de tels sols instables, le mouillage préalable de la terre avec l'eau par capillarité pendant une nuit transforme la terre en boue et la circulation de l'air au cours du ressuyage ultérieur sous vide partiel ne se fait pas normalement à travers toute la masse.

Pour cette raison, les mesures par centrifugation donnent des résultats meilleurs, comparables aux chiffres obtenus par pression (Studer R., 1961).

Le recours aux profils hydriques qui est une technique de terrain, comparée aux courbes de pF, a permis de préciser les limites d'application des mesures classiques de laboratoire dans l'évaluation des réserves hydriques d'un sol.

b) *Perméabilité*

Les observations sur le terrain ont mis en évidence les points suivants :

— la perméabilité effective d'un horizon en place n'a pas de rapport avec la perméabilité d'un point particulier isolé de son contexte ; on constate des mouvements

d'eau préférentiels le long des voies privilégiées qui correspondent soit à une variation de granulométrie, même minime, soit à des voies ouvertes par des animaux ou même certains types de racines (luzerne notamment) ;

— cette propriété est également accusée par l'extrême hétérogénéité des dépôts.

Dans ces conditions, on conçoit l'erreur qui consisterait à prévoir des prélèvements ponctuels très localisés, type Vergières (BOURRIER, 1954).

Les propriétés intrinsèques de ces sols amènent une remarque complémentaire : la notion elle-même de perméabilité ne constitue pas toujours une donnée bien définie ;

— les sables instables sont perméables tant qu'ils ne sont pas saturés et forment couche écran au-delà. L'état de saturation lui-même est mal défini, puisqu'il reste subordonné à l'intensité de la pluie, à l'état du sol, à la végétation, etc.

— certaines argiles, non protégées par de la matière organique, mais caractérisées par leur fort retrait, présentent une perméabilité de fissure élevée en début de saison qui diminue progressivement au cours de sa réhumectation.

Dans ces conditions, des mesures de K sur le terrain, même si l'on fait abstraction de l'hétérogénéité, paraissent difficiles à appliquer ici :

— celles qui font appel à la mesure d'un débit en un point du terrain localement mis en charge (type flacon de Muntz : A. DEMOLON 1952) correspondent à un état momentané du sol, d'ailleurs trop différent de celui qui existe quelques décimètres plus loin ;

— celles qui font appel à la mesure d'une vitesse de remontée d'eau dans un puits, au-dessous du niveau hydrostatique (méthode du trou de tarière) (X, 1959) supposent qu'il existe une nappe souterraine et non de véritables courants d'eau qui entraînent l'éboulement de l'horizon étudié.

Dans de tels sols, les mesures classiques de perméabilité ne trouvent donc pas de possibilités d'interprétation sûre. Ici, moins qu'ailleurs il ne pourrait être question de calculer un réseau de drainage à partir de formules théoriques faisant intervenir la vitesse de filtration par unité de pente.

L'observation du comportement du terrain, une fois drainé, permet seule de juger *a posteriori* de la validité de la technique adoptée, et d'en concevoir les perfectionnements. Par analogie, le système devient alors applicable aux mêmes types de sols (BETREMIEUX R., GOBILLOT Th. 1961), étant entendu qu'en terrains hétérogènes des surprises restent possibles ; ultérieurement, l'addition d'un drain supplémentaire peut s'avérer nécessaire pour recouper une veine plus imperméable qui maintient une zone d'embourbage.

c) *Porosité*

Dans les horizons d'apparence podzolique, instables à l'eau, la porosité totale est faible (35 à 37 p. 100), liée au tassement effectivement constaté. Le plus souvent la composante granulométrique est très sableuse ; pour cette raison, la microporosité (calculée à partir de la capacité au champ) est relativement peu élevée ; elle est ainsi sensiblement égale à la macroporosité, ce qui dénoterait théoriquement une perméabilité correcte et une aération convenable du milieu.

Or ces horizons ne sont pas perméables et sont réducteurs en période pluvieuse

A l'opposé, certaines argiles bien structurées de sous-sol ont une macroporosité

pratiquement nulle ; elles sont pourtant perméables et bien occupées par des racines qui présentent une anatomie normale.

Si les mesures de densité apparente peuvent être utiles pour l'évaluation des réserves hydriques — avec les restrictions précisées précédemment à ce sujet — les évaluations de micro-et macroporosité doivent donc être interprétées avec prudence ; l'erreur consisterait à confondre facilement deux notions différentes, celles du « volume d'air occupé à la capacité au champ », traduite par la macroporosité, et celle de « composition de la phase gazeuse à la capacité au champ » ; celle-ci est liée aux possibilités de renouvellement de l'air, c'est-à-dire finalement à l'existence d'une structure du sol en place plus ou moins fine et plus ou moins stable.

d) *Les limites d'Atterberg*

L'évaluation des limites d'Atterberg et leur comparaison aux courbes de pF constituent un couple de données constructives dans la détermination des conditions de travail d'un sol.

Au niveau de la couche superficielle. — Les sols les plus difficiles à travailler sont les sols riches en limons ; la gamme d'humidités à l'intérieur desquelles ils peuvent être pris correctement est très étroite. Les mesures physiques traduisent ce comportement.

Alors que la capacité au champ correspond à un pF voisin de 2,8, la limite de plasticité se tient aux environs de 2,9 - 3 et la limite de liquidité vers pF 2,5-2,6 ; le sol doit donc être travaillé lorsqu'il est à peine ressuyé, ce qui explique les difficultés pratiques des agriculteurs.

Au niveau du sous-sol argileux. — Ces mesures physiques traduisent également des différences sensibles de comportement entre types différents d'argile :

— les argiles détritiques du plein centre de Brenne ont un indice de plasticité relativement étroit et une limite inférieure correspondant à une humidité élevée, à peine inférieure à la « capacité au champ «, (LIP : pF 3 à 3,5). Cette donnée explique l'apparence toujours sèche de ces argiles, leur structure très cassante ;

— les argiles de bordure de Brenne ont un indice beaucoup plus élevé et la limite inférieure de plasticité correspond à un étatde dessiccation poussé (pF > 4, jusqu'à 4,4).

Ces comportements différents tiennent au moins en partie à la nature différente des argiles (voir page 166).

Les conséquences pratiques sont importantes dans une optique de mise en valeur qui prévoit des essais de sous-solage, avec ou sans fertilisation en profondeur ; facile en pleine Brenne, tout au moins en ce qui concerne l'argile, le travail profond paraît actuellement irréalisable dans les argiles vertes qui se dessèchent à peine.

Cette remarque ne préjuge en rien de la durabilité de l'intervention qui, elle, reste sous l'étroite dépendance de la stabilité de l'horizon ; les argiles détritiques de pleine Brenne ne devant leur stabilité qu'à la protection organique autour des grosses mottes, l'éclatement mécanique de la structure actuelle ne paraît pas a priori favorable.

6° Conclusion.

A la condition expresse de prendre les précautions indiquées par les auteurs de la méthode, complétées par une attention particulière au prélèvement pour qu'il soit suffisamment représentatif, les méthodes des tests d'instabilité structurale fournissent

des indications précieuses, surtout pour les horizons non superficiels ; les variations enregistrées dans les valeurs obtenues sur les différents sols étudiés correspondent à des différences de comportement vis-à-vis de l'eau effectivement décelable par l'observation sur le terrain. Ces tests constituent donc un élément essentiel d'interprétation dans une optique de mise en valeur de sols hydromorphes.

L'obstacle le plus grave à l'efficacité d'un réseau de drainage est l'instabilité à l'eau, liée à la dégradation subie par l'horizon hydromorphe d'apparence podzolique au-dessus de l'argile. Les tests permettent une classification schématique valable du degré de dégradation ;

— avec $S > 4$ et $K < 0{,}4$ l'horizon est « très dégradé » ; le drainage sera peu efficace si l'on n'intervient pas pour améliorer la structure.

— avec $1{,}5 < S < 3$ et $0{,}5 < K < 1{,}5$, l'horizon est « dégradé » ; le drainage n'aura pas une efficacité immédiate mais constituera l'amorce d'une amélioration naturelle ;

— avec $S < 1{,}2$ et $K > 1{,}5$, la dégradation est peu importante et le drainage sera efficace.

Pratiquement les deux derniers cas ne posent pas de problème d'option dans la perspective d'aménagement. Le premier, par contre, nécessite une attitude d'expectative. Les observations en cours décèlent une évolution favorable de la structure sous l'influence de techniques complémentaires du drainage mais ne constituent pas encore des données suffisantes pour trancher le problème. Logiquement ce type de sol doit être laissé en attente de décision.

L'autre obstacle au drainage est constitué par les argiles présentant un fort retrait et qui deviennent imperméables sous régime pluvieux continu. Les tests de perméabilité permettent de dépister ce cas à la condition de prolonger le temps de percolation pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours.

La méthode Hénin d'évaluation de l'instabilité structurale semble donc pouvoir remplacer avantageusement les autres méthodes classiques de mesures des caractéristiques physiques et hydrodynamiques dans le cas de sols instables. De façon générale, ils peuvent constituer un critère supplémentaire fondamental dans une étude préalable d'aménagement hydraulique de territoire.

Les « normes » acquises en Brenne ne peuvent toutefois être extrapolées à d'autres terroirs sans réétalonnage systématique à partir de données fournies par le terrain lui-même : une mesure de laboratoire ne peut avoir de valeur que lorsque la plante en place reste son facteur d'interprétation.

L'examen du « profil cultural » reste donc la technique d'étude de base ; la simple observation ne permet sans doute pas de résoudre tous les problèmes, mais elle permet de les poser, et de les poser correctement. Le « terrain » se révèle d'abord un procédé d'analyse immédiat et sensible, pour devenir rapidement un instrument remarquable de synthèse des données fournies par le laboratoire.

Toutefois, si la technique du profil cultural semble devoir être toujours payante, elle n'est pleinement constructive que dans le cadre d'études systématiques suffisamment vastes, portant sur le plus grand nombre possible de sols ; les examens doivent être répétés au cours du temps ; ils supposent des conditions d'exploitation culturales parfaitement connues.

Ces impératifs exigent donc la mise en place d'un réseau de « champs d'observations », différents dans leur esprit des champs d'essai culturaux classiques ; un

minimum d'hétérogénéité est ici très fécond, les parcelles doivent être d'autant plus grandes que de nombreux trous sont à prévoirs ; les « répétitions » se font surtout à travers le temps et l'espace entre différents secteurs d'un même type.

Dans une région comme la Brenne où il n'existe aucune structure d'exploitation bien définie, la mise en place préalable de ce réseau de champs d'observations est indispensable ; la nécessité d'avoir des conditions d'exploitation connues nécessite que ces champs soient ensuite cultivés par nous. Mais ailleurs, il peut être possible d'utiliser les structures existantes ; l'étude porte alors sur de multiples parcelles choisies au sein d'exploitations en place.

Quoi qu'il en soit, et quelle que soit la formule possible, la méthode du profil cultural, toujours fructueuse, ne sera pleinement féconde qu'appliquée dans le cadre des conditions culturales bien connues pendant plusieurs cycles végétatifs et sous différents assolements : dans ces conditions, elle permet de définir avec sûreté et précision, les différents facteurs de production d'un sol et de constituer la documentation indispensable à un projet d'aménagement de territoire.

QUATRIÈME PARTIE

CARTOGRAPHIE DE LA BRENNE. PRINCIPES ET EXEMPLES.

A. — Principes

Comme on l'a vu dans la 1re partie de cette étude, le problème de la mise en valeur de la Brenne se pose de façon simple sur le plan des principes : un ennoyage temporaire prolongé rend les sols pratiquement incultivables, voués à un abandon total si une technique efficace d'assainissement n'est pas mise en œuvre. L'intervention doit se faire à deux niveaux : au niveau de la parcelle à assainir mais aussi au niveau régional par l'aménagement des émissaires, depuis les rivières principales jusqu'aux fossés à la sortie des propriétés particulières. De tels travaux collectifs ne sont viables que s'ils permettent l'assainissement d'une surface cultivable suffisante.

La cartographie de la Brenne est donc menée dans un but bien défini :

— permettre d'évaluer les surfaces « récupérables » correspondant aux bassins versants des différents émissaires ;

— préciser les conditions techniques de cette « récupération ».

Comme l'ensemble de cette étude s'est efforcé de le montrer, la cartographie s'intègre en fait étroitement dans l'activité menée sur le terrain récemment drainé dans le cadre d'une expérimentation culturale de longue durée. Les études de comportement du sol et du végétal in situ étayent constamment la cartographie, précisent l'importance relative des critères morphologiques observés et permettent une première interprétation de la prospection bien avant que celle-ci soit terminée.

Grâce à ces études sur terrains drainés, la prospection peut être faite uniquement par sondages et se dispenser presque toujours de profils sur fosses. De même, le nombre d'analyses, assez important au départ, est ensuite considérablement diminué : c'est sur les profils culturaux des champs d'essai analysés en détail, que les prospecteurs entretiennent leurs facultés d'appréciation.

La technique de prospection adoptée repose finalement sur un nombre restreint d'analyses de contrôle : elle suppose l'existence d'une « équipe de terrain » polyvalente qui soit partagée entre la prospection et les études fines sur les champs d'essai. Un cloisonnement entre le prospecteur-pédologue et l'agronome ne permettrait pas l'adoption d'une telle méthode.

Le stade de l'enquête.

Au premier stade, les observations permettent de constituer des documents descriptifs ; les critères retenus sont uniquement morphologiques et tout essai d'interprétation arbitraire est banni.

Toutefois l'optique finale n'est pas ignorée ; c'est elle qui oriente la technique cartographique. Pour les raisons économiques et humaines qui ont été précédemment développées, c'est un assainissement par drainage qui est recherché au niveau de la parcelle ; c'est donc avec l'optique drainage que l'étude est menée.

Deux points sont à retenir avec cette perspective :

— les caractères morphologiques essentiels pour les travaux de drainage et le comportement ultérieur du sol drainé sont à observer et à noter de façon prioritaire. Les autres observations d'intérêt purement pédologique sont relevées dans la mesure du possible mais restent accessoires ;

— l'échelle de la prospection est à adapter aux besoins. Une échelle fine est sans intérêt dans les secteurs « non récupérables ».

Il est également inutile de prévoir une précision qu'un projet de drainage ne peut pratiquement pas respecter.

Tout en se limitant aux aspects purement morphologiques des profils, cette carte descriptive est donc pratiquement, dès son premier stade, une carte d'utilisation.

Le stade de l'interprétation.

Le problème consiste à reconnaître dans les caractères morphologiques observés (et transcrits) des critères de comportement spécifiques des différents sols, bien définis par ailleurs. Les études des types de sols, telles qu'elles ont été précédemment développées, doivent fournir à leur stade final, les éléments nécessaires à cette interprétation.

La carte-état-des-lieux doit donc permettre en principe ;

— au niveau de la parcelle, de guider le projet de drainage et de concevoir la technique ultérieure optima de culture ;

— au niveau de la région, de permettre la conception du projet de mise en valeur d'ensemble.

Le dernier chapitre est consacré à l'ébauche de ces différentes cartes, telle que nous le permet l'état actuel des études.

B. — La cartographie descriptive (stade de l'enquête)

1° Les caractères cartographiés et leur traduction

a) *Les caractères cartographiés*

L'optique drainage et mise en valeur incite à s'attacher particulièrement aux points suivants :

1. *Les obstacles mécaniques aux travaux,* avec distinction entre le banc rocheux (à faire sauter à la mine), le banc pierreux (à attaquer au pic) et l'horizon caillouteux (à attaquer probablement au pic) : une faible proportion de cailloux suffit à élever le coût des travaux.

2. *La perméabilité* du terrain dans ses différentes couches : la texture, la structure et l'observation du profil lui-même à l'intérieur du trou en sont les composantes principales :

α) *La texture.* — L'appréciation de la texture est plus complète que ne l'exige la seule optique drainage ; elle doit normalement permettre de se rendre compte si l'on est devant un profil ou une succession de dépôts différents.

Pratiquement, la texture est appréciée au doigté après étalonnage sur des analyses granulométriques et vérifications systématiques ultérieures.

Le doigté permet l'évaluation approximative :

— du taux d'argile, en 4 classes d'intervalle très large ;

< 10 p. 100,
10 à 25 p. 100,
25 à 50 p. 100,
> 50 p. 100,

— de l'importance relative des limons (fraction 20-50 μ) et de la répartition des éléments sableux :

cailloux > 2 cm,
graviers 2 à 4 mm,
sables grossiers 1000-2000 μ
sables « moyens » 500-1000 μ
sables fins 50-500 μ

β) *La structure.* — La structure est difficile à apprécier sur sondage. Toutefois l'étude parallèle de profils dans le cadre des champs d'essai montre qu'il existe une relation entre la structure plus ou moins cimentée d'une part, la couleur et les difficultés de pénétration de la sonde d'autre part. La couleur et la présence de nodules ferriques sont donc relevées, complétées par des remarques sur la compacité.

Ce dernier critère relève d'une appréciation personnelle, parfaitement valable pour un prospecteur donné manipulant toujours le même type de sonde, et « entretenant » ses facultés physiques d'interprétation par des sondages sur les différents types de sols des champs d'essai pour les profils hydriques.

γ) *La circulation de l'eau.* — Le niveau imperméable est observé avec soin; le sens et l'intensité de la circulation des veines liquides internes sont notées. Les horizons « secs » sont différenciés des horizons « humides » et des ennoyages superficiels. Le pseudo-gley, milieu réducteur ou momentanément réoxydé, est relevé. La position topographique est évidemment précisée. Les plantes indicatrices de l'ennoyage sont des indices sûrs (joncs, carex, molinie, etc..)

Toutes les données d'interprétation ultérieures de l'hydromorphie se trouvent donc réunies. Pour être complètes et bien interprétables, elles exigent simplement que la prospection soit faite en dehors des périodes d'inondation généralisée ; quant aux sécheresses intenses, elles constituent davantage un obstacle mécanique pour le prospecteur qu'un obstacle théorique : la structure et la compacité du profil desséché restent très subordonnées, comme on l'a vu, à son état en période humide et les horizons hydromorphes se repèrent facilement.

3. *L'état cultural.* — Pour chaque parcelle étudiée, l'occupation actuelle du terrain est précisée sommairement et une appréciation de l'état de la culture est donnée, axée surtout sur les caractères liés aux conditions d'ennoyage.

b) *La traduction schématique des caractères cartographiés*

L'étude se fait à deux niveaux :

— sur le terrain lui-même, par le prospecteur qui doit relever tous les caractères à observer,

— au laboratoire par le même prospecteur qui assure la mise au propre de ses relevés dans une présentation facile à lire et à interpréter par le pédologue responsable.

L'expérience montre qu'à ces deux niveaux, certaines règles sont à respecter :

Pour le terrain : Le prospecteur doit avoir en main le code des caractères à relever, y compris l'annotation relief et état des cultures. Le recours à un simple carnet vierge entraîne des oublis regrettables.

Pour le laboratoire : L'expérience montre qu'une fiche descriptive par sondage — au sens littéral du terme — est fastidieuse à lire et ne peut même plus être lue de façon constructive lorsqu'on cherche à exploiter les résultats d'une journée de travail sur le terrain.

Une fiche qui prévoit le simple cochage de colonnes — standard prévoyant la totalité des caractères susceptibles d'être rencontrés, présente à peu près les mêmes défauts que le système précédent.

Seul le recours à une présentation schématique des profils permet une exploitation rapide des résultats et la comparaison immédiate de points éloignés dans le temps et l'espace. Il y a d'autre part intérêt à diminuer le nombre de fiches : plusieurs sondages sont prévus par feuille, étant entendu qu'un nombre entier de feuilles est réservé à une même parcelle.

1.) *Les fiches.*

Un modèle des feuilles utilisées, aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire, est donné ci-contre à tire d'exemple (fig. 36). Il prévoit :

— la date, les références à la commune, le domaine, la parcelle au moment du sondage ;

— une série de 6 schémas de profil en blanc, avec l'échelle des profondeurs de 0 à 1 m (suffisante dans le cas particulier de la Brenne) ;

— une coupe de relief conventionnel destiné à permettre de localiser par une croix et le n° correspondant les différents sondages. Cette topographie arbitraire permet la distinction entre : sommet — bombement léger — plat — thalweg — pente légère et forte ; et dans chacun de ces deux derniers cas : haut de pente, mi-pente, bas de pente ;

— un emplacement pour les observations complémentaires manuscrites, comprenant notamment une appréciation de la compacité.

2.) *Le code.*

Le code tend à mettre en relief les caractères fondamentaux pour le drainage. Il utilise (fig. 37) :

— des signes à l'intérieur du profil schématique pour les textures ;

— des couleurs superposées aux signes pour les couleurs observées et le gley ;

— des flèches latérales au schéma pour le niveau et l'importance des zones de circulation d'eau.

— des traits latéraux au profil pour l'appréciation des degrés de sécheresse relatifs entre les différents horizons d'un même profil.

Quelques schémas caractéristiques sont relevés ici à titre d'exemple (fig. 36). Comme on peut le constater, les critères essentiels à une cartographie pédogénétique ultérieure sont notés. (1)

c) *La traduction schématique des résultats d'analyse*

Les analyses granulométriques qui complètent certains des sondages sont traduites, elles aussi, sous forme schématique. Comme le montrent les deux exemples ci-après (fig. 38), ce mode de représentation est très classique (DEMOLON A., 1952) ; il se complète par le tableau correspondant de chiffres et le pH des différents horizons.

2° LE FOND CARTOGRAHIQUE ET L'ÉCHELLE ADOPTÉE

Le quadrillage du terrain s'adapte aux conditions locales de relief, malgré la signification limitée au point de vue pédologique de la topographie en Brenne; il dépend surtout du type de cartographie entrepris.

a) *La topographie*

L'étude détaillée des sols de Brenne a montré l'hétérogénéité et la complexité des dépôts. Pratiquement la cartographie doit tenir compte des conclusions suivantes :

1. Sauf colluvionnement fréquent en bas de pente, il n'existe pratiquement pas de chaînes de sols en Brenne. Les buttes peuvent correspondre à des affleurements de grès mais aussi à des placages de sables; le grès peut n'imprimer aucun relief particulier à la surface; seuls les «butons» de l'arête anticlinale sont bien individualisés.

2. Il n'existe pas de relation étroite entre le relief actuel et le degré d'hydromorphie. Seules les cuvettes maintenues ennoyées par un obstacle topographique important sont systématiquement très dégradées. Inversement, par contre, des sols en pentes, bien modelés, qui ne posent aucun problème topographique d'écoulement peuvent rester très longtemps gorgés d'eau s'ils ont une structure instable.

3. En tout état de cause, il existe, à l'échelle de la parcelle, une hétérogénéité qui permet tous les passages d'un type de sol à un autre. Ces passages ne sont qu'exceptionnellement progressifs. Le plus souvent c'est à un imbriquage étroit que l'on assiste.

Dans ces conditions, une prospection, aussi fine soit-elle, est toujours inexacte dans dans le détail. C'est l'unité cartographique qu'il s'agit de définir avec ses limites de précision.

(1) Pour les besoins de l'impression, les couleurs sont remplacées ici par des lettres conventionnelles latérales au profil.

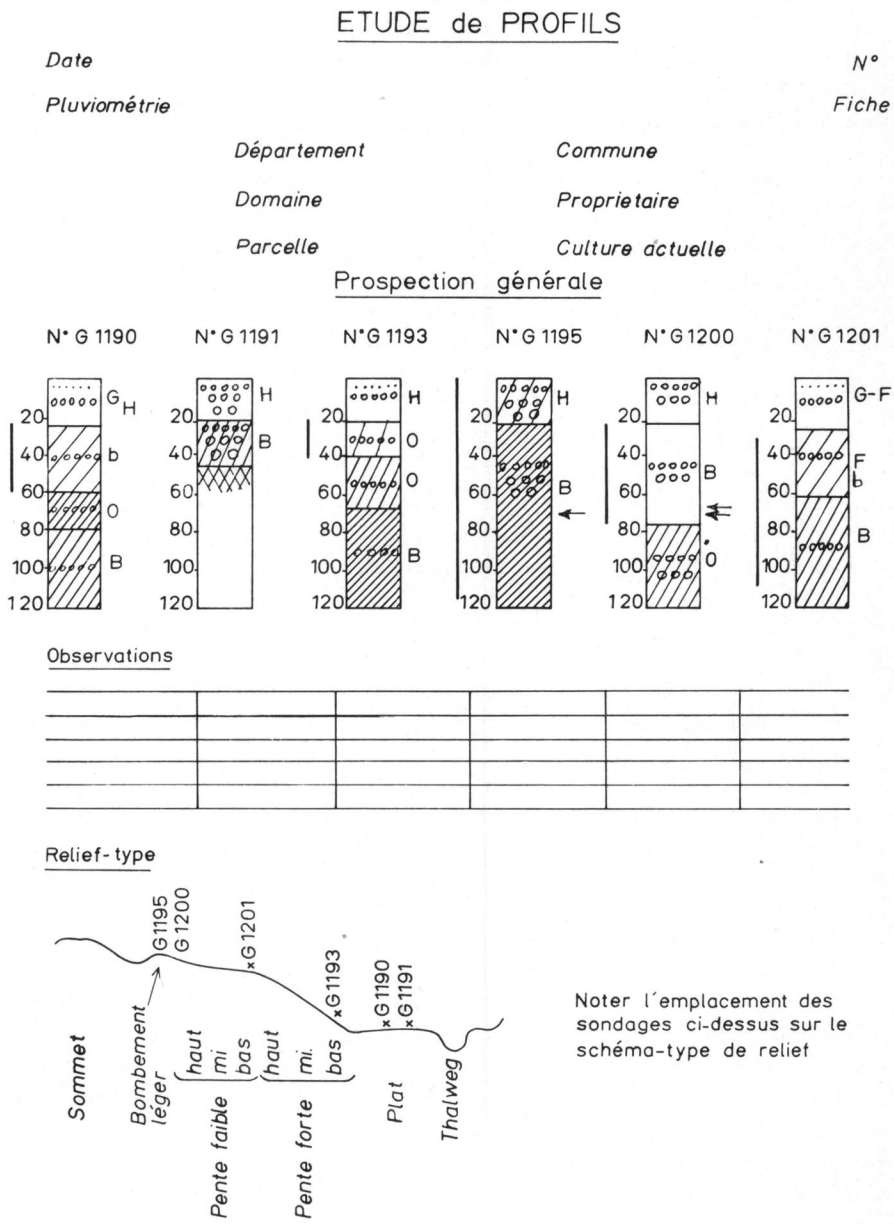


FIG. 36. — *Fiche de sondages ; quelques exemples de profils (voir légende fig. 37)*

Les Textures

Sables		Argile et Calcaire		Banc pierreux	
	Cailloux		< 10 % Argile		à attaquer au pic
	Graviers		10 à 25 %		à attaquer à la mine
	Sables > 500 μ		25 à 50 %	Blocage par	Grès
	Sables fins		> 50 %		Cailloux
	Limons		Présence de calcaire		Calcaire

Le gley et les couleurs remplacés pour les besoins de l'impression par des lettres latérales aux profils.

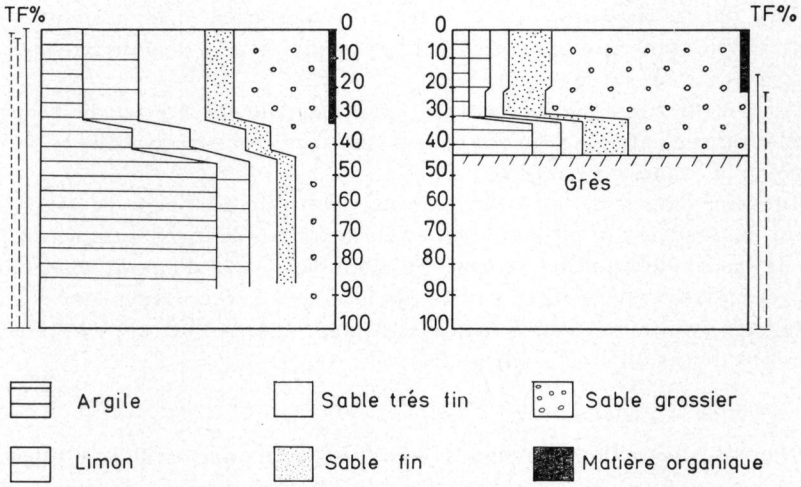
Gley actuel : points bleus (G),
Concrétions ferriques : points marrons (F),
Horizon humifère : gris foncé (avec ou sans points bleus) (H),
Horizon blanchi ;
très dégradé : blanc (*b*)
moyennement dégradé : conventions ci-dessous } avec ou sans points marron
Autres horizons (sous-sol) :

couleur du sol en place	*couleur code* :	
beiges	jaune	
bruns	brun	B,
marmorisés	orangé et blanc par lits ou taches	O
vert pâle	vert	

Circulation d'eau :
Flèche au niveau considéré à gauche du schéma
→ suintement ⇉ venue d'eau franche.

Degré de sécheresse relative :
Trait latéral, à droite du profil, de l'épaisseur considérée ;
bleu foncé : très mouillé (eau libre),
bleu clair : ressuyé,
gris : sec (seul cas représenté ici).

FIG. 37. — *Légende des fiches de sondages*



	0-30	30-40	40-85	0,20	20-30	30-40	Grès
	—	—	—	—	—	—	—
Sable grossier	32	22	14	64	68	40	
Sable fin	10	8	6	14	16	16	
Sable très fin	22	20	10	8	6	8	
Limon	20	18	10	6	4	8	
Argile	14	32	60	6	6	28	
Matière organique	2	—	—	2	—	—	
pH	6,8	6,1	5,7	6,6	6,3	6,1	

FIG. 38. — *Représentation schématique des analyses granulométriques et tableau d'analyses correspondant*

b) *Le type de cartographie*

Deux types de cartographie sont menés conjointement. Si les principes de base restent les mêmes, le fond cartographique et l'échelle adoptée sont différents dans les deux cas :

— dans la cartographie dite générale, il s'agit d'une étude sommaire destinée à évaluer l'ordre de grandeur des surfaces récupérables sur un bassin versant donné. Elle est donc menée à une échelle relativement petite, indépendamment des propriétés particulières ;

— dans la cartographie dite de détail, il s'agit d'une étude beaucoup plus fine menée dans le cadre des Associations Syndicales de drainage ; la prospection sert de base à l'établissement du projet de drainage sur le domaine ou la partie du domaine étudié.

α) *Prospection générale.*

Dans la prospection générale, le fond cartographique utilisé est la section cadastrale au 1/2 500 partout où le cadastre est révisé (cas très fréquent) ; le dessin exact du parcellaire permet de localiser avec suffisamment d'exactitude au cours de la prospection les sommets et les thalwegs. En l'absence de relevé cadastral actuel, le recours aux photographies aériennes est nécessaire, mais elles sont de manipulation beaucoup moins commode.

Quelle que soit la carte, les sondages sont faits tous les 100 à 200 mètres, l'écart étant d'autant plus faible que les parcelles sont plus petites et l'importance des haies plus grandes. Les zônes ouvertes, désertiques, à relief tranché par la présence de butons est à écart maximum. Dans ces conditions, le dessin des plages de sol reste d'autant plus imprécis que l'échelle du fond cartographique est importante ; il est guidé par les remarques sur le relief et la végétation, mais les limites dessinées par un simple trait représentent en fait des bandes de 2 à 3 cm de large sur la carte, soit 50 à 75 mètres sur le terrain.

Autrement dit, le tracé n'est exact que transposé sur une échelle beaucoup plus petite, comprise entre le 1/50 000 et le 1/100 000 ; celle-ci est valable et suffisante au niveau du « bassin versant ».

Inexacte dans le détail, la délimitation arbitraire des plages de sols d'après une densité de sondages trop faible permet de répondre de façon valable au problème posé de la délimitation des secteurs récupérables : ceci d'autant mieux que cette prospection lâche est recoupée par les examens plus précis menés lors des chantiers de drainage des Associations Syndicales et étayée par la suite par les études de comportement de ces différents sols drainés.

β) *Prospection de détail.*

Dans la prospection de détail, le fond cartographique est le levé topographique au 1/2 000 établi par les soins du service du Génie rural. Le quadrillage de sondages est relativement serré, de 70 à 80 mètres. L'expérience montre qu'au niveau de la parcelle (de 3 à 10 ha) cet écartement est encore insuffisant pour prévoir l'extrême variabilité due à l'hétérogénéité des dépôts. Il est pourtant inconcevable de resserrer encore cet intervalle, d'autant plus qu'au stade de l'établissement du projet, il est impossible de respecter les détails de variations des sols.

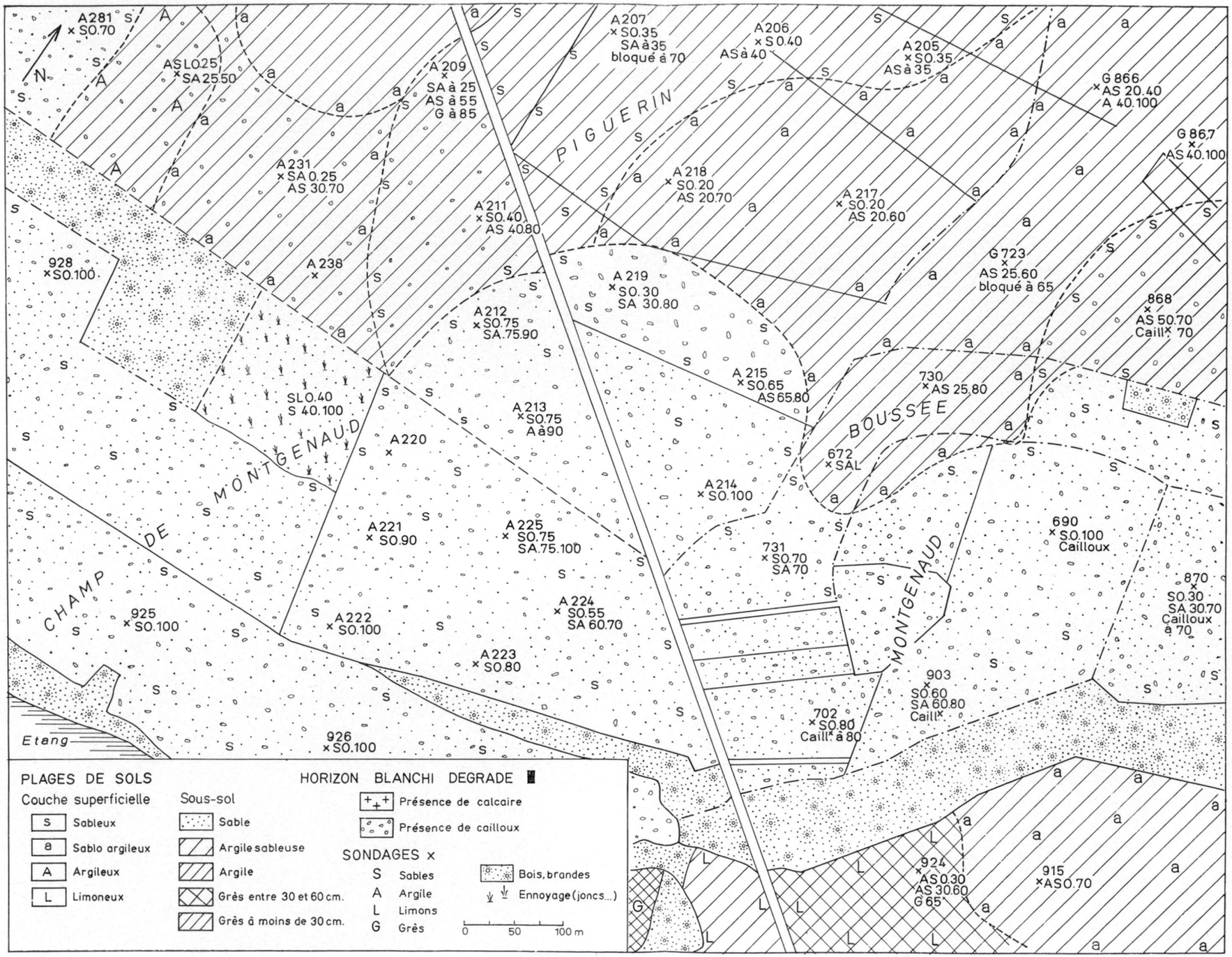


FIG. 39. — *Cartographie descriptive Saint-Michel, Section* 12

(Légende : remplacer, dans la légende ci-dessus pour le « Grès à moins de 30 cm, » les hachures simples par des hachures croisées à 1,8 mm. d'intervalle).

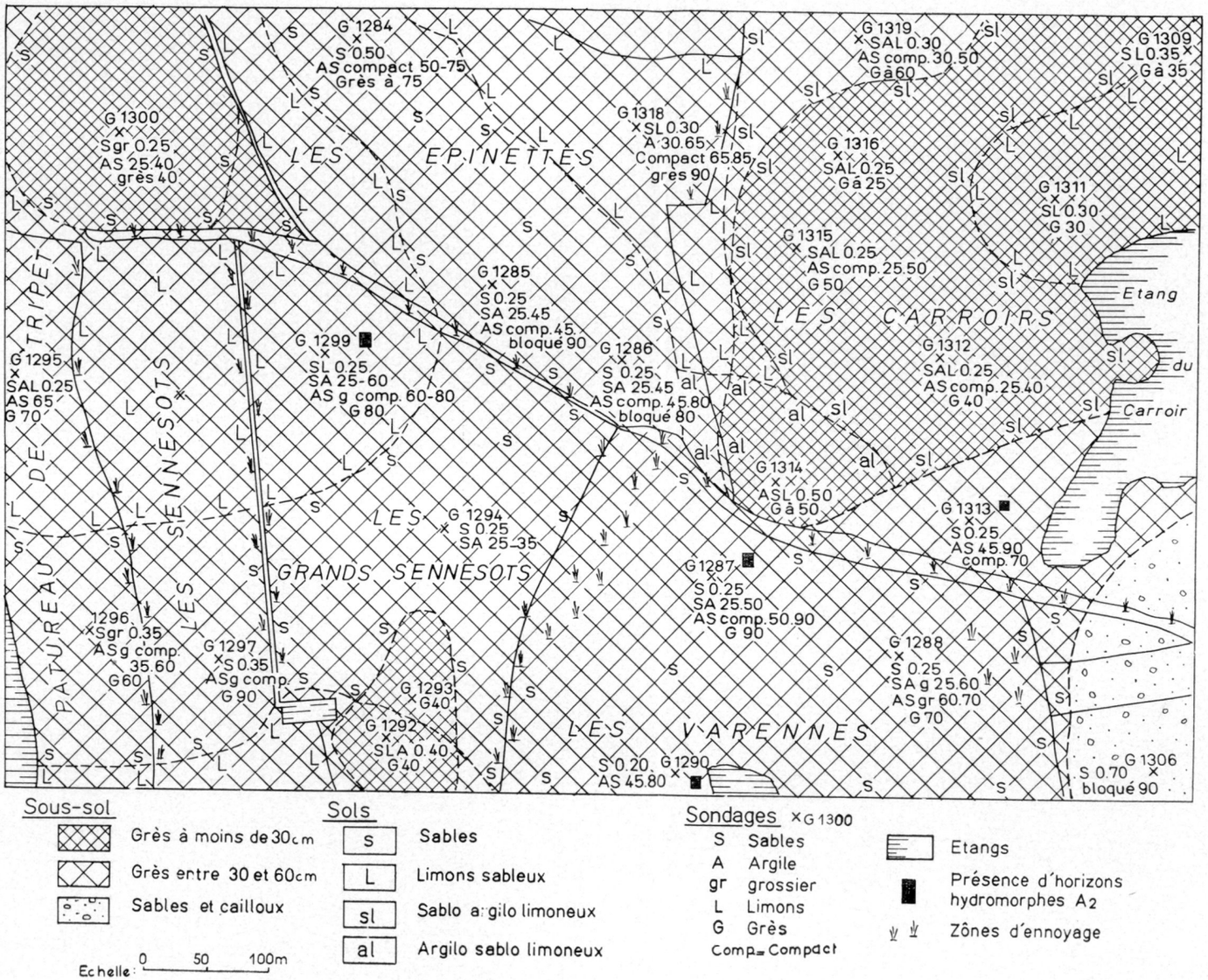


FIG. 40. — *Cartographie descriptive Mézières-en-Brenne*

Le trait limitant les plages de sols correspond donc en fait à une bande d'environ 20 mètres sur le terrain (1 cm sur le plan) ; des affleurements de grès peuvent passer totalement inaperçus.

L'étude d'une parcelle isolée — même grande — reste donc sans signification. Par contre, à l'échelle d'un domaine (80 à 100 ha), la répartition géographique des « types de sols » est nette et il ressort de la cartographie de détail une vue d'ensemble permettant de prendre une décision valable sur le principe même d'un aménagement par drainage sur ce secteur et de prévoir un ordre de grandeur du coût des travaux. Ceci posé, il convient de s'attendre constamment à trouver des affleurements de grès limités même dans les secteurs à priori les plus favorables.

3°) La carte-états des lieux

Dans un but de simplification et de clarté, la représentation schématique des différents sols se limite à la superposition d'une couleur, représentative de la texture superficielle, et d'un signe traduisant la nature de l'horizon profond considéré comme fondamental pour le comportement du profil (grès, argile, sable meuble, etc.). Les horizons intermédiaires ne sont pas représentés, mais notés avec leur profondeur à l'emplacement des différents sondages, par des lettres conventionnelles. La présence d'horizons hydromorphes très mal structurés est signalée par un signe spécial. Les secteurs longuement ennoyés, repérés par la présence de roseaux ou un gley intense aux racines, sont hachurés de bleu. Les détails complémentaires sont supprimés mais ils se retrouvent dans les fiches descriptives, prêts à être utilisés pour une conception différente du travail actuel.

Deux exemples de « cartographie générale » sont fournis ici avec la légende correspondante (fig. 39 et 40). Les originaux sont au 1/2 500 (1) ; ils sont réduits ici au quart et couvrent ainsi une surface sensiblement égale à la section cadastrale ; l'impression d'ensemble fait ressortir les différences fondamentales entre ces deux « types de secteurs ». Elle confirme la valeur pratique d'une telle cartographie malgré son inexactitude dans les détails.

C. — L'interprétation de la cartographie

1° Bases d'interprétation

Les conclusions des études de comportement (IIIe partie, chapitre III, page : 303 à 305) constituent la base d'interprétation de la cartographie. Celle-ci peut se faire d'ailleurs à deux niveaux différents : au niveau de la parcelle et à l'échelle de la région.

Dans le 1er cas, elle tient compte du type ou des types de sol, avec leurs facteurs limitants spécifiques.

Dans le 2e cas, elle tend simplement à définir les zones récupérables sur chacun des versants correspondant aux émissaires généraux à aménager.

(1) Les originaux sont en couleur. Celles-ci sont remplacées par les lettres conventionnelles pour les besoins de l'impression. Ces cartes sont évidemment moins évocatrices que les originaux.

2° Les types de sols, leur localisation géographique, quelques propositions pour leur aménagement

Les différents types de sols ont été présentés en détail dans la IIIe partie de cette étude (p. 99 à 130), et les conclusions précisées pour chacun d'eux; leur rappel est donc très bref ici.

Quelques chiffres de rendements obtenus dans le cadre des champs d'essai situent leur niveau de production et introduisent quelques propositions pour leur aménagement.

Cette classification reste schématique : l'extrême hétérogénéité doit rester présente à l'esprit et le grès est susceptible d'être rencontré à peu près partout. C'est l'importance relative d'un type parmi d'autres qui permet de classer une parcelle donnée dans un des groupes proposés ci-dessous et de prévoir pour elle un aménagement « moyennement » valable pour l'ensemble.

1er *groupe. Les sols squelettiques*

Il ne faut pas donner à ce terme un sens trop pédologique, mais entendre simplement par là les sols sur grès dur à moins de 55 cm.

Ce vocable recouvre non seulement les affleurements de grès sous la forme de butons topographiquement bien individualisés, mais également les dépôts de sables ou d'argile sous forme de poches comblant les infractuosités d'un grès sous-jacent, préalablement remodelé en surface de la façon la plus anarchique ; l'ensemble, recouvert de sables plus ou moins grossiers, donne des sols d'épaisseur localement très variable mais inférieure à 55 cm.

C'est le type de la Brenne centrale, avec son paysage lunaire de butons pelés, et, sur les deux versants de l'anticlinal, le secteur à microrelief accusé, morcelé par des haies vigoureuses maintenant l'engorgement de fossés d'assainissement effondrés (type La Poupetterie, p. 271).

Ce secteur, qui représente à lui seul plus de 50 000 ha paraît difficile à aménager systématiquement par drainage, étant donné :

— la faible épaisseur des sols qui oblige à poser des drains dans le roc, ce qui augmente considérablement le coût des travaux ;

— corrélativement un potentiel hydrique faible et sans espoir d'amélioration.

Dans ces conditions, les céréables ne résistent pas aux pointes d'évapotranspiration pouvant durer trois semaines au cours du printemps. Par contre, l'absence de défaut fondamental de structure fait que les cultures d'été implantées tardivement lorsque l'excès d'eau a disparu peuvent, par un été humide, donner d'excellents rendements (80 q de maïs en 1960).

Sur le plan agronomique, on arrive donc à la conclusion suivante :

— le drainage est à prévoir avec une très forte plus-value due à la présence de grès. Il ne résoud pas le problème du déficit hydrique trop important pour les céréales et les temporaires. On se trouve donc devant une option :

— Si l'on veut à tout prix imprimer à ce secteur un caractère agricole, un complément d'irrigation (à partir des réserves naturelles que constituent les étangs) paraît nécessaire au moins sur des surfaces limitées consacrées soit à l'obtention d'un complément de nourriture pour les troupeaux en pâturages ailleurs (plantes sarclées

fourragères) soit à un noyau d'intensification par des cultures spéciales à définir. L'aspect économique du problème reste à étudier.

— Si la valorisation par la culture n'est pas indispensable, une étude complémentaire paraît nécessaire pour préciser dans quelle mesure le reboisement est possible (des pins maritimes semblent s'accrocher facilement aux « butons »). La chasse et la pêche sont également du domaine du forestier. Un aménagement touristique compléterait ce mode de mise en valeur ;

— une solution mixte reste possible, d'autant plus qu'à l'intérieur de cette zone « condamnée », la prospection de détail permet de dépister de petits îlots de 1 à 2 ha sans grès, la plupart du temps dans les bas de pente colluvionnés ; ces sols posent alors d'autres problèmes, ils entrent dans le type décrit plus loin.

Sur le plan pratique, cette solution mixte agro-sylvo-pastorale serait la plus difficile à réaliser, exigeant de résoudre à la fois les problèmes d'hydraulique générale (aménagement et entretien des émissaires, aménagement des réserves en eau), de reboisement, de mise en culture, de protections contre le gibier, etc.

2e *groupe. Les sols de sables caillouteux profonds* (*type alluvial grossier*)

Ils occupent 1 000 à 1 500 ha dans le nord de la Brenne sur les communes de Mézières et Saint-Michel entre les derniers affleurements de grès et la Claise (rivière) : ils correspondent au secteur relativement plat de la Biénaise (page 273).

On peut y rattacher, sur le plan agronomique, toutes les « sablières » situées plus à l'est et au nord de la Claise, sur la commune de Vendœuvres. Au type alluvial on peut également rattacher les secteurs sableux et caillouteux des terrasses anciennes de la Creuse sur les communes de Ciron et Ruffec (sud de la Brenne).

Le caractère commun à tous ces sols « profonds » est leur faible capacité de rétention en eau liée à la fois à leur granulométrie grossière et à la faible pénétration racinaire ; même les céréales de printemps précoces sont presque systématiquement échaudées, les rendements de 32 q d'orge sont exceptionnels.

Dans le cas bien étudié des sablières de la Biénaise trois solutions paraissent devoir être envisagées :

1° Obtenir un approfondissement du front racinaire, limité par la présence d'un alios ou de cailloutis très compacté. Trois moyens complémentaires sont à envisager : le sous-solage pour briser l'obstacle mécanique, l'emploi d'engrais phosphatés solubles pour relever le niveau chimique en profondeur et l'implantation d'espèces à grosse puissance d'enracinement (luzerne du Poitou) ; les anciennes luzernières paraissent d'ailleurs partout beaucoup plus saines que le reste.

2° Dans la mesure où les données de topographie et d'hydraulique locales le permettent, il y aurait intérêt à poser les drains assez profonds et à maintenir un plan d'eau à ce niveau (Robelin M., 1960) à partir des étangs. Ce niveau doit tenir compte a priori de la faible remontée capillaire dans ces sols grossiers et caillouteux (Rode, 1956), et du type de culture envisagé (Luthin 1957) = a priori, il semblerait pouvoir être situé vers 70 ou 80 cm pour les plantes annuelles.

3° Un complément d'irrigation reste très possible, mais en se souvenant qu'il s'agit de sols à faible capacité de rétention où les engrais seront facilement lessivés, d'où la nécessité de recours à des doses faibles répétées et d'une mise au point des conditions optima de fertilisation azotée.

3e *groupe. Les sols de sables fins profonds*

Ils paraissent couvrir une surface moins importante en Brenne que les précédents mais on les retrouve sur les plages cénomaniennes au nord de la Claise sur la commune de Sainte-Gemme. Ils représentent au total plusieurs milliers d'hectares.

Au point de vue du comportement, c'est le type de sol du domaine de Claise — type *a*, page : 271. Ce sont des sols perméables et disposant de réserves hydriques suffisantes dans la mesure où l'enracinement est puissant. Une luzerne-fétuque par exemple a produit dans l'année qui a suivi le semis de fin d'été (année humide) plus de 10 tonnes de matière sèche et en deuxième année (année très sèche) 8 tonnes en trois coupes, à majorer d'une quatrième exploitation non contrôlée en novembre.

Comme dans le type précédent, le maintien d'une nappe en profondeur pourrait être favorable lorsqu'elle est possible. Une remontée capillaire meilleure est probable.

L'irrigation serait utile avec des doses probablement plus fortes que précédemment mais une pluviométrie horaire plus faible.

Par leur composition granulométrique assez fine mais non battante ce serait les meilleures terres à légumes de la Brenne.

4e *groupe. Les sols sablo-argileux grossiers*

C'est le type La Prêle que l'on rencontre en bordure de la Claise (p. 278). On peut y rattacher les sols hétérogènes de bordure de Creuse où l'on rencontre étroitement imbriqués, sables, argile, grès, pouddingues, calcaire, etc. Au total ces sols semblent couvrir 3 à 4 000 ha.

Ils sont caractérisés par l'absence de problèmes graves de structure : ils sont donc perméables ; ils réagissent favorablement au drainage et très rapidement, ils deviennent faciles à travailler.

Leur capacité en eau est moyenne ; elle pourra être améliorée par un approfondissement de l'épaisseur de sol exploitée, actuellement limitée par une compacité trop grande entretenue par l'ennoyage.

Les rendements en blé peuvent atteindre 45 q dès le deuxième année qui suit le drainage. Ces sols sont les meilleurs de Brenne pour les céréales.

Le plus gros obstacle est l'hétérogénéité extrême de ces sols d'un mètre à l'autre, avec, au nord des affleurements limités d'argile (type ci-dessous) plus difficiles à travailler et des poches de sables brûlants, et, en bordure de Creuse, des affleurements pierreux (calcaires ou grès).

5e *groupe. Les sols très argileux*

C'est le type de La Roche (p. 280) géographiquement imbriqué avec le précédent en bordure de la Claise. On peut y rattacher les argiles à silex du nord de la Claise en prévoyant pour elles deux sous-classes : les argiles à silex dépourvues de cailloux et les argiles caillouteuses (où le coût des travaux de drainage est alors plus élevé). Au total 5 à 7 000 ha, appartenant au bassin versant de la Claise, entrent dans cette classe.

Ces sols sont caractérisés par leur faible perméabilité liée à leur teneur élevée en argile d'un type « gonflant » ; le drainage permet l'évacuation rapide des premières

pluies, mais devient inefficace en période de pluie prolongée qui provoque le colmatage des fentes de retrait.

Dans ces conditions les semis de blé aboutissent à des échecs ; les céréales de printemps bénéficient par contre de réserves hydriques suffisantes.

L'amélioration de ces sols reste subordonnée à l'implantation d'un type de prairies qui ne craint pas l'asphyxie. Le développement radiculaire en profondeur devrait maintenir une perméabilité de fissure suffisante et rendre accessibles des réserves hydriques au moins égales au déficit théorique de l'année moyenne.

Des essais en cours doivent préciser les limites de ces possibilités d'amélioration. Toutefois le drainage à faible écartement peut être considéré dès maintenant comme favorable ; il permet le travail du sol en fin d'été, début d'automne et par là les semis de céréales de printemps à une date normale.

6e *groupe. Les sols limono-argileux*

On les trouve sous forme de plages importantes vers le nord-ouest et le sud-est de la Brenne et quelques placages disséminés dans le Sud. Ils couvrent plusieurs milliers d'ha. C'est le type de la Bertellerie ou des Brandes (p. 292 et 296).

Ce sont des sols très argileux en profondeur, mais d'une structure assez stable et par conséquent assez filtrants. Le principal obstacle semble résider dans une structure superficielle déficiente, liée à la teneur élevée en éléments très fins non colloïdaux. Ces sols sont très difficiles à travailler passant de l'état de poussière à l'état de boue collante et colmatante dès la première pluie ; l'installation d'un réseau de drains ne permet pas en première année l'évacuation suffisamment rapide des pluies pour être réellement efficace ; pour ces sols il serait normal de penser à un assainissement par planches.

L'expérimentation mise en place il y a deux ans confirme qu'une première culture en blé est effectivement vouée à l'échec ; mais les rendements de deuxième année atteignent 35 q et ceux des orges de printemps 42 q : le drainage fonctionne beaucoup mieux qu'au début. Les conditions de travail du sol restent toutefois difficiles ; comme dans toutes les terres à tendance battante, l'assolement doit rester à base de prairie.

Les réserves hydriques sont ici les plus importantes de toute la Brenne : ces sols sont capables de porter des plantes d'été même en année sèche. Leur récupération doit donc se faire même s'ils présentent des difficultés de travail et exigent un type d'assolement défini. Le drainage est à concevoir avec un réseau relativement serré.

7e *groupe. Les sols fins à horizon A_2 très dégradé*

C'est l'exemple du domaine de Claise type *c* (page : 287) : sol d'apparence podzolique particulièrement dégradé par l'hydromorphie. Il correspond à une granulométrie des sables triés autour de 200 μ.

Ces sols se rencontrent de préférence sur la moitié nord de Brenne au-delà de la zône anticlinale mais assez souvent dans des secteurs voisins d'affleurement de grès (La Guignerie). Si l'on ne tient pas compte de ces derniers, à rattacher au premier groupe au point de vue de l'aménagement régional d'ensemble, les sols de ce type n'occupent qu'une surface de 1 000 à 2 000 ha situés entre le domaine de Claise et les sables grossiers de la Biénaise.

Jusqu'à présent, le drainage dans ces sols n'a pas été vraiment efficace ; le sol reste gorgé d'eau et l'horizon A_2 ne se laisse pas coloniser. Un modelé en planches paraît a priori voué au même échec : des cultures en billons étroits dans le sens de la pente et recoupés par un fossé à la base baignent dans l'eau tout l'hiver sans que la moindre goutte s'écoule dans le bas.

Ressuyés par évaporation, ces sols deviennent faciles à travailler mais très secs (50 q de Maïs en année humide, 15 q en année sèche — un trèfle-fétuque de 2 ans a complètement grillé dans l'été 1961).

Sur ces sols, des essais d'irrigation ont été favorables à la colonisation de l'horizon hydromorphe par le maïs. Des essais ultérieurs doivent préciser dans quelle mesure des arrosages peuvent constituer un moyen de mise en valeur complémentaire, indispensable à l'efficacité de l'investissement-drainage.

Pratiquement, dans l'état actuel des études, ces sols sont à rejeter d'un plan d'aménagement systématique en vue de la culture.

8e *groupe. Les sols « moyens » à tendance battante et horizon A_2 moyennement dégradé*

C'est le cas le plus généralement rencontré (en dehors du premier groupe), surtout dans les pourtours de Brenne et notamment du côté Est. C'est l'exemple de la Plaine Ronde (p. 298). Il correspond aux sables peu triés, logarithmiquement assez bien répartis entre 2 et 800 μ, avec un taux d'argile ne dépassant pas 10 p. 100 en surface et 15 à 25 p. 100 d'éléments très fins compris entre 2 et 50 μ, d'où leur tendance facile à la battance, à l'engorgement superficiel et au tassement.

L'expérience de la Plaine Ronde montre que ces sols — malgré un niveau de fertilité extrêmement bas au départ — sont parfaitement susceptibles de s'améliorer après drainage. Les blés sont à éliminer ; même les céréales de printemps donnent des résultats médiocres. Mais les prairies temporaires, implantées dans de bonnes conditions, donnent des productions très satisfaisantes (8, 7 t de M.S. en deuxième année humide) et améliorent considérablement le profil. Les études en cours doivent préciser l'intérêt probable d'une association à base de luzerne qui exploite plus rapidement le sous-sol qu'un trèfle dans les conditions de sécheresse intense fréquentes en été.

9e *groupe*

Le 9e groupe est signalé simplement pour mémoire, mais il ne fait pas partie des sols tertiaires de Brenne ; il s'agit des affleurements de calcaire jurassique qui donnent des sols bruns ou de rendzines. Leur granulométrie est beaucoup plus grossière que celle des sols de Champagne berrichonne. Le calcaire en dalle qui est souvent à la base provoque ici également des phénomènes d'hydromorphie difficiles à résoudre par le drainage.

3° La carte d'interprétation a l'échelle de la parcelle

A l'échelle de la parcelle, la première carte descriptive est, comme on l'a vu, une carte d'utilisation et ne nécessite par conséquent aucune intervention complémentaire ; seule la légende prend une autre signification, d'ailleurs non explicitement précisée :

— les plages de grès correspondent aux zenes non drainées ou aux secteurs aménageables avec une plus-value de travaux dont l'ordre de grandeur peut être évalué ;

— les autres plages de sols profonds font l'objet d'un tracé de drains à écartement variable, fonction du type de profil ;

En fait, ce dernier problème n'a pas reçu de solution définitive et mathématique ; les projets actuellement conçus (1) tiennent compte des résultats obtenus sur les premières réalisations en respectant deux principes fondamentaux :

1° Des modifications du projet peuvent intervenir en cours des travaux pour tenir compte de points particuliers non dépistés à la prospection (veines d'argile à recouper, présence de grès à éviter). La formule adoptée doit rester très souple.

2° Un écartement adopté, nécessaire pour drainer convenablement tel type de sol dans son état actuel peut devenir trop largement conçu pour l'avenir lorsque le sol sera amélioré. On aborde ici le problème longuement évoqué par ailleurs du dynamisme des propriétés d'un sol, mais dans ses interférences avec l'aspect économique. Les données actuellement acquises sur le plan technique ne permettent pas encore de poser le problème économique de façon précise. On se trouve devant la nécessité d'un choix, mais pratiquement l'expérience montre qu'un espacement trop large ne permet pas le déclenchement de l'évolution du sol.

4° La carte d'interprétation a l'échelle régionale

Bien que la cartographie générale ne soit pas terminée et demande encore 2 à 3 ans au rythme prévu, la présentation d'une carte schématique est possible dès maintenant. Une prospection sporadique tendant à réaliser la jonction entre les secteurs bien étudiés des Associations Syndicales de drainage (fig : 41) donne un aperçu valable à l'échelle du 1/100 000 et suffisante pour l'établissement du plan d'aménagement des émissaires généraux.

A cette échelle, la Brenne se trouve découpée en 4 secteurs :

1° *Les zônes récupérables par le drainage.* — Elles correspondent aux types 2, 3, 4, 5, 6 et 8 précédemment définis, depuis les sols secs de sables profonds jusqu'aux argiles peu perméables et même les sols d'apparence podzolique moyennement dégradés. Ces zônes ceinturent le centre Brenne.

L'intervalle entre les drains et l'assolement à prévoir diffèrent selon les types mais il ne s'agit que de nuances non représentées sur une carte d'ensemble à petite échelle.

2° *Les zônes non récupérables par le drainage.* — Elles correspondent aux affleurements de grès de toute la Brenne centrale (type 1). Techniquement le drainage est possible et efficace mais la rentabilité de l'opération sur le plan général est sûrement négative.

Ce secteur peut être laissé en culture extensive, ou intensifié sur des zones de surface limitée, qu'il s'agisse d'irrigation à partir des étangs ou même de drainage là où la profondeur du sol est exceptionnellement suffisante et les conditions topographiques favorables sans nécessiter d'aménagement d'ensemble. Ce secteur peut être également destiné à des fins non agricoles.

(1) Essais faits par M. C. Urvoy.

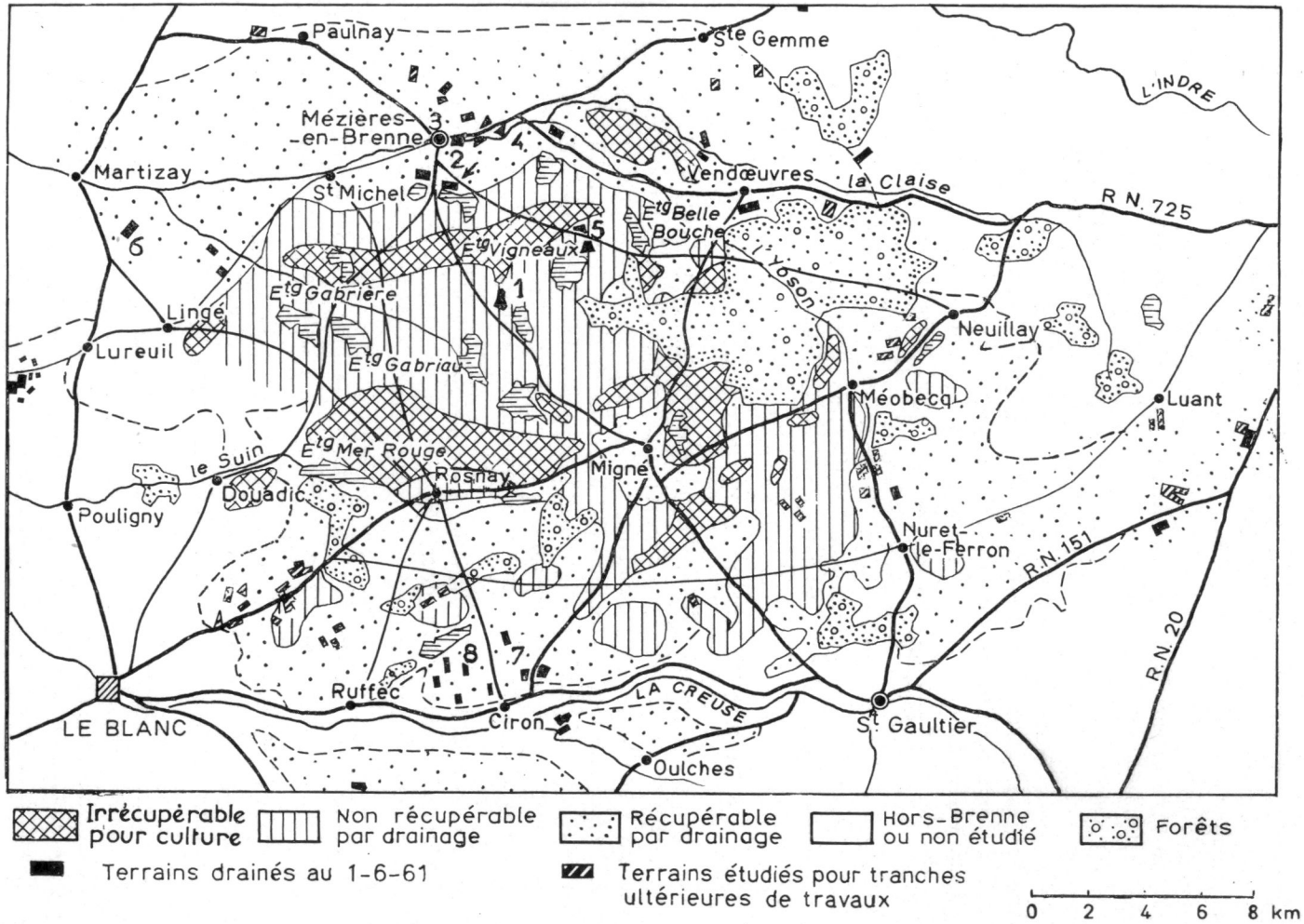


FIG. 41. — *Carte de mise en valeur de la Brenne*

Les nos dans la carte correspondent aux secteurs d'étude suivants :

1 : La Poupetterie ; 2 : La Biénaise ; 3 : La Prêle ; 4 : La Roche ; 5 : La Claise ; 6 : La Bertellerie; 7 : Les Brandes ; 8 : La plaine Ronde

3° *Les zones à laisser en attente de décision.* — (1) Elles correspondent aux sols particulièrement dégradés qui n'ont pas réagi favorablement au drainage jusqu'à présent. La poursuite des études en cours doit permettre pour ces sols une opinion définitive dans 2 ou 3 ans.

4° *Les zones irrécupérables pour la culture.* — Il s'agit ici des secteurs où le grès affleure à peu près partout à moins de 30 cm, sauf dans les bas-fonds qui ne présentent de toutes façons aucun écoulement naturel. Les quelques efforts actuels de culture n'ont pas d'intérêt pour l'avenir. C'est la zone anticlinale des butons qui pourrait présenter surtout un attrait touristique. C'est aussi, plus au Nord, une seconde bande de grès à butons bien moins individualisés.

Cette interprétation schématique laisse la possibilité de précisions complémentaires sur échelle plus grande dans les années à venir. Elle permet aussi d'ouvrir un débat plus large sur les possibilités de mise en valeur de la Brenne par des moyens mixtes non exclusivement agricoles.

---

(1) Ces zones n'apparaissent pas sur la fig. 41 d'échelle trop réduite = elles se situent à la limite des secteurs 2 et 4 de la moitié Nord de la Brenne ou à l'intérieur du secteur 2.

CONCLUSIONS

La Brenne est une région déshéritée par ses sols gorgés d'eau l'hiver, très secs l'été ; sa mise en valeur entre dans le cadre des Aménagements de Territoire.

Mais la nature des sols eux-mêmes et la structure humaine de cette région posent des problèmes complexes sous le double aspect technique et économique ; des études préalables à tout projet d'ensemble sont apparues indispensables. Elles ont été entreprises à la demande du service du Génie rural responsable, et en collaboration avec ce service par la Station d'Agronomie de Châteauroux. C'est l'aspect agronomique du problème qui fait essentiellement l'objet de ce Mémoire.

Même restreint dans ce sens, le sujet est encore trop vaste pour être traité dans ses détails. Seuls ont été conservés les éléments essentiels dans une optique de mise en valeur ; la présentation pédologique, base élémentaire de toute cartographie, a été volontairement limitée ; par contre les problèmes de physique des sols dominent tous les autres et les résultats acquis dans ce domaine dépassent largement le cadre régional ; c'est la raison pour laquelle les conclusions de cette étude peuvent être présentées à deux échelles différentes : au niveau de la Brenne d'abord, sur le plan général de la recherche ensuite.

A. SUR LE PLAN RÉGIONAL

La Brenne est une région naturelle de 146 000 ha, dont 80 000 entre la Creuse et la Claise constituent « la Brenne » au sens local du terme. L'unité géographique de l'ensemble est due à l'origine géologique de la formation. Rattachée au Sidérolothique, celle-ci est constituée par des dépôts détritiques mis en place à l'Éocène moyen et supérieur et ultérieurement très remaniés. Ces dépôts sont surtout formés d'éléments arrachés au Cristallin, altérés au point que le quartz en reste pratiquement le seul constituant ; l'ensemble est souvent consolidé à la base en grès à ciment argileux kaolinique, sur toute l'arête anticlinale du substrat calcaire, c'est-à-dire sur les 50 000 ha de la Brenne centrale.

Dans toute la partie comprise entre les deux rivières, l'extrême hétérogénéité des dépôts, la désaturation du matériau, un microrelief accusé et l'absence de réseau hydrographique organisé sont autant de facteurs qui vouaient les sols de Brenne à l'hydromorphie. Une déforestation massive du Moyen Age au XVIIe siècle a rendu ces sols encore plus fragiles.

En bordure de Brenne, les dépôts détritiques précédents sont mêlés à des éléments issus du Jurassique ou des alluvions anciennes. L'ensemble n'est pas désaturé et est moins altéré qu'en pleine Brenne, mais il s'agit souvent aussi d'argiles peu perméables.

Finalement qu'il y ait ennoyage par une position topographique défavorable (bas-fonds) ou par la présence d'un horizon imperméable (grès, argile ou sable fluent), cette hydromorphie temporaire est généralisée et constitue le caractère commun à tous les sols de Brenne ; ceux-ci entrent pratiquement tous dans la classe des sols hydromorphes continentaux de la classification française de AUBERT-DUCHAUFOUR.

Un examen de détail plus fin permet de faire une subdivision en deux grands types de sols : le premier, géographiquement le plus important, comprend tous les dépôts hétérogènes où l'hydromorphie constitue le seul caractère pédologique ; l'autre est constitué par les profils où l'hydromorphie s'est superposée à une évolution antérieure ; les éléments en notre possession ne permettent pas d'être affirmatif mais sont en faveur d'un lessivage ancien intense ; l'apparence podzolique de ces sols serait seulement une conséquence de leur hydromorphie actuelle.

Par leur caractère de pseudo-gley, les sols de Brenne ennoyés l'hiver, très secs l'été, ne sont pas cultivables dans des conditions normales ; c'est le pays de la lande et des étangs ; d'anciennes prairies semées sur planches sont des pacages très extensifs pour l'élevage du Charollais. L'assainissement est le premier pas à franchir dans une optique de mise en valeur. Dans le contexte humain et économique actuel, c'est le drainage par poterie qui paraît être la solution efficace.

Les études de comportement des différents sols ont montré qu'ils ne réagissaient pas tous au drainage de la même manière : leur perméabilité totale est beaucoup moins liée à la granulométrie des horizons intéressés qu'à la stabilité de leur structure à l'eau. Cette instabilité des horizons d'apparence podzolique — même sur profil hétérogène — est à l'origine d'une imperméabilité d'autant plus poussée que le degré de dégradation par cette hydromorphie est plus élevé.

Le drainage ne peut être envisagé que là où il est réellement efficace et d'un coût normal ; il est donc exclu des zones gréseuses ou trop caillouteuses et des secteurs où le sol « ne draine pas ».

Les zones récupérables par le drainage se limitent au pourtour de la Brenne (10 000 à 15 000 ha), ses prolongements dans les « queues de Brenne » (40 000 à 50 000 ha) et les régions humides des départements voisins (Montmorillonnais). Mais le centre Brenne avec ses 50 000 ha de butons et d'étangs paraît difficilement aménageable pour une culture intensive.

Les zones récupérables elles-mêmes se subdivisent en plusieurs types correspondant à des exigences différentes et par conséquent des types différents d'exploitation ultérieure. Dans l'ensemble, tous les sols de Brenne posent un « problème d'eau », qu'il s'agisse de déficit hydrique en été ou d'une instabilité structurale limitant la perméabilité à l'eau et la nutrition normale des plantes ; les deux aspects se cumulent d'ailleurs souvent sur un même sol. De façon accessoire et momentanée, ils posent également un problème de dynamique de l'azote.

Tous les problèmes sont loin d'être résolus, mais les solutions commencent à s'entrevoir nettement. Il reste surtout à préciser les conditions optima pour accélérer l'évolution du sol vers sa forme finale améliorée et viable ; deux points fondamentaux entre autres sont encore en cours d'étude :

— l'éventuel intérêt de la fertilisation en profondeur dans les sols peu perméables et à pouvoir adsorbant élevé ;

— la possibilité de recours à l'irrigation comme moyen complémentaire et provisoire de restructuration des sols.

Quant à la Brenne centrale, elle ne peut être purement et simplement éliminée d'un aménagement d'ensemble. Pour elle, l'irrigation apparaît plus utile que le drainage, mais supposerait des types d'exploitation très différents de la formule actuelle. S'il n'y a aucun besoin vital, sur le plan national, à mettre en culture ce secteur, il apparaît plus logique de l'aménager pour le tourisme avec chasse, pêche et éventuellement reforestation partielle si celle-ci est techniquement possible.

Si le contour des possibilités d'aménagement est donc bien dessiné sur le plan technique, il reste à signaler par contre le grave problème économique posé au niveau de l'exploitant.

L'infrastructure agricole est bonne, mais les disponibilités en main-d'œuvre et surtout en capitaux sont faibles. Si l'exploitant est considérablement aidé par l'État dans la réalisation de ses travaux de drainage (subvention importante et prêt à long terme avec différé de 5 ans), il ne peut arriver, avec ses propres moyens, à intensifier suffisamment sa production pour valoriser les capitaux investis ; la création de prairie à haute productivité, l'augmentation du cheptel, l'équipement en moyens de récolte et de conservation des fourrages, l'orientation vers des spéculations plus rentables exigeraient un investissement supplémentaire immédiat considérable.

En l'absence d'une injection extérieure de capitaux, l'intérêt immédiat du drainage se limite à fournir au cultivateur brennou des conditions de travail meilleures en lui permettant de mettre à plat ses terres, mais la productivité en sera longtemps très faible au cours d'une intensification progressive, lente et limitée.

B. SUR LE PLAN GÉNÉRAL.

Les études menées à propos de la Brenne ont permis de dégager un certain nombre de points fondamentaux dans le domaine de la physique des sols et quelques principes généraux de méthodologie applicables aux Études de mise en valeur.

Dans l'évaluation des réserves hydriques d'un sol, les possibilités d'enracinement, c'est-à-dire de profondeur exploitable, sont apparues comme essentielles. Les caractéristiques physiques et hydrodynamiques des sols peuvent par contre devenir secondaires. Le comportement d'un sol est finalement lié à sa structure et surtout à la stabilité de cette structure à l'eau.

Les tests d'instabilité structurale traduisent bien ce comportement in situ et l'évolution de ce comportement au cours du temps. Ils apparaissent notamment comme un critère sûr de la dégradation de la structure par l'hydromorphie et de la régénération de cette structure après assainissement et techniques culturales appropriées.

L'interprétation de ces tests reste toutefois difficile sans une connaissance très approfondie du terroir ; leur généralisation trop hâtive peut constituer un danger ; en tout état de cause, l'observation systématique et répétée du compor-

tement du sol et de la végétation in situ reste la seule base d'interprétation sûre et valable de toutes les mesures de laboratoire.

Ces études sur le terrain ont permis de dégager une notion essentielle : l'opposition entre le sol actuel, statiquement caractérisé par des chiffres d'analyse et le sol futur dans son dynamisme plus ou moins poussé, fonction des traitements que l'on lui fera subir.

Dans ces conditions, des études de mise en valeur régionale ne peuvent se concevoir sans expérimentation préalable des techniques d'aménagement prévues ; ceci suppose une première phase de travaux sur des superficies réduites, le contrôle de leur efficacité et la mise au point au moins partielle de leurs modalités d'utilisation ultérieure. Cette phase expérimentale n'exige pas plus de 3 à 5 années selon les sols pour permettre une option valable sur le principe même de l'Aménagement et une orientation convenable des techniques à adopter. Elle permet en outre de bien poser sur le plan régional le problème de l'intensification culturale dans son cadre économique et social.

Cet aspect expérimental des études préalables à une mise en valeur est finalement apparu plus fondamental que la prospection pédologique systématique de la région. Pratiquement expérimentation et cartographie se mènent de front, mais c'est la première qui oriente la seconde.

La prospection garde ici pour but essentiel l'établissement d'une carte d'utilisation des sols et d'une carte générale de mise en valeur ; elle trouve donc ses bases dans les études de détail des parcelles expérimentales qui seules permettent de dégager les critères morphologiques correspondant aux différents types de comportement et par conséquent d'aménagement.

Sur le plan général de la connaissance des sols, l'établissement ultérieur d'une carte pédogénétique doit d'ailleurs rester possible, à partir des fiches descriptives de sondages, conçues pour présenter de façon facilement lisible les éléments nécessaires d'information.

De l'activité consacrée à la Brenne depuis 3 ans, il ressort que les études entreprises ont été plus fructueuses sur le plan général que sur le plan régional où les contingences économiques constituent le plus réel obstacle à la mise en valeur des sols. Les résultats obtenus peuvent toutefois trouver leur application ailleurs qu'en Brenne, dans les régions déshéritées par leurs « sols humides ».

La méthode de travail adoptée ici peut également être retenue dans le cadre d'études préalables aux Aménagements régionaux.

Mais cette activité a également montré à quel point le sol en place peut constituer un milieu d'Études par excellence ; il permet de bien poser sur le plan fondamental les problèmes précis et souvent urgents soulevés par le monde agricole. L'exploitation des données qu'il fournit peut orienter et compléter utilement certaines recherches de base.

SUMMARY

AN AGRONOMICAL CONTRIBUTION TO THE UTILIZATION OF THE SOILS OF THE BRENNE (HYDROMORPHIC SOILS)

A discussion of the agricultural prerequisites of utilizing the soils of the Brenne, situated in a natural region which is characterized by a temporary hydromorphy of soils, associated with an

impermeable layer (sandstone or clay) overlain by a generally sandy horizon having a structure of very low water stability.

In its geographical and social context, the problem consists of determining to what extent thes soils may be reclaimed by drainage (using covered drains).

While methods of classical pedology permit to classify these soils and to explain their genesis, they are unsuitable for solving the existing problem.

In situ studies of the soils and vegetation are more rewarding : if carried out within the framework of cropping experiments on recently drained soils, such studies permit to differentiate between various types of behaviour, for each of which a method of management may be devised. Furthermore, this approach is useful in determining characteristic morphological features of the profiles, furnishing a basis for the interpretation of soil maps.

Such *in situ* studies, accompanied by laboratory determinations, resulted in defining the limits of application of theoretical concepts of soil physics, such as permeability, field capacity, pF at field capacity, relationship of the latter to the permanent wilting point, water reserves in the profile, etc.

The determination of structural instability appears to provide a valid measure, for a given soil type, of the degree of degradation caused by hydromorphic conditions. The interpretation of there values remains, however, difficult without any detailed knowledge on the soils in the field.

ZUSAMMENFASSUNG

AGRONOMISCHER BEITRAG ZUR ERSCHLIESSUNG DER BRENNE (HYDROMORPHE BODEN)

Verfasser bringt eine vorläufige Richtigstellung zur Frage der Erschliessung der Brenne, eint natürliche Gegend mit zeitweiliger Hydromorphie der Böden, verursacht durch die Anwesenheie einer durchlässigen Schicht (Sandboden oder Ton) mit darüberliegend gewöhnlich sandigem Horizont und von sehr labiler Struktur gegenüber Wasser.

Geographisch und sozial gesehen, besteht das Problem darin, zu bestimmen, inwieweit diese Böden durch Drainage (im Boden liegende Drains) erschliessbar sind.

Das klassische Studium gestattet eine Lokalisierung dieser Böden und lässt ihe Bildung ahnen, jedoch nicht der gestellten Frage zu antworten.

Das Studium des Verhaltens der Böden und der Vegetation in situ bringt hingegen mehr Aufbauendes : im Rahmen eines Kulturversuchs auf jüngst drainiertem Boden erlaubt es die verschiedenen « Typen » des Verhaltens aufzuspüren, und für jeden gültige Lösungen zur Erschliessung vorzuschlagen. Gleichzeitig können die morphologischen charakteristischen Kriterien der verschiedenen Profile näher bestimmt werden und die Grundlagen zur Erklärung der Kartographie liefern.

Durch diese an Ort und Stelle durchgeführten Studien, durch Laboratoriumsversuche ergänzt, konnten die Anwendungsgrenzen verschiedener theoretischen und klassischen Begriffe der Bodenphysik, wie Durchlässigkeit, Feldkapazität, pF derselben, Beziehung zwischen dieser Charakteristik und dem Dauerwelkepunkt, Schätzung der Wasserreserven eines Profils usw, erfasst werden.

Die Teste über Strukturstabilität sind für einen gewissen Boden eine gültiges Kriterium für den Grad seiner Degradierung durch Hydromorphie. Die Auslegung dieser Teste ist immer schwierig ohne vorherige gründliche Erkenntnis des Bodens selbst.

РЕЗЮМЭ

Агрономическая мелиорация района Бренн (Гидроморфные почвы).

СУСАННА ПЭРИГО (Шатору).

Автор предлагает в данной статье предварительную агрономическую подготовку для мелиорации природного района Бренн, характеризующегося временной гидроморфностью своих почв. Гидроморфность эта вызвана непроницаемым грунтом (песчанник или глина) над которым находится обычно песчанный горизонт с очень неводопрочной структурой.

Задача, помещенная предварительно в свой географический и социальный контексты, заключается в том чтобы определить, в какой мере почвы эти возможно возстановить при помощи дренажа (закопанные дрены).

Классическое педологическое изучение помогает определить эти почвы, а также отчасти и их почвообразование. Но оно не может дать ответа на поставленную задачу.

Разсмотрение на месте « поведения » этих почв и их растительного покрова являются элементами гораздо более конструктивными : проведенное в рамках культурального эксперимента на только-что продренированных почвах оно позволяет выявить различные типы « поведения » почв и предложить для освоения каждого типа наиболее целесообразное решение. Параллельно этому, изучение помогает уточнить характерные морфологические особенности разных профилей и получить благодаря этому основы интерпретации картографии описательного характера.

Изучение почв на месте совместно с мерами лабораторного характера дали возможность установить границы применения в почвенной физике некоторых классических теоритических понятий : водопроницаемость, полевая влагоемкость pF при полевой влагоемкости, соотношение между этой характеристикой и влажностью постоянного завядания, оценка запасов влаги данного профиля и т. д.

Измерения неводопрочности структуры данной почвы являются по мнению автора приемлемым критерием для установления степени ее деградации гидроморфией. Интерпретация этих измерений остается однако трудной без предварительного глубокого ознакомления с почвами в полевых условиах.

ANNEXES

Annexe I

QUELQUES PRÉCISIONS SUR LES PUITS ET FORAGES EXÉCUTÉS EN BRENNE POUR A. E. P.

Le Service du Génie rural a fait exécuter en Brenne un certain nombre de puits et forages pour adduction d'eau potable. Les rapports du Géologue Officiel ne précisent que l'épaisseur de « Brenne » traversée avant que le calcaire jurassique ne soit atteint ; il y a très peu de données sur la nature de la roche éocène. Seuls les forages exécutés au cours des deux dernières années ont été suivis par nous et ont permis une meilleure compréhension des dépôts.

I. — Puits et forages antérieurs a 1958

Les forages antérieurs à 1958 permettent de mettre en évidence la variabilité de l'épaisseur de dépôts bartoniens.

1. — *Méobecq* (centre Brenne)

a) Premier puits de recherche, en bordure Est de la route Méobecq-Nuret, à 600 mètres du bourg, sur l'affleurement calcaire dessiné sur la carte géologique ; en fait le calcaire est surmonté de 19 mètres de Brenne, sables et grès dur ; à la base sables très fluents (puits abandonné).

b) Deuxième puits (puits d'A. E. P.), en bordure nord de la route Neuillay-Méobecq à l'embranchement de la route vers Lothiers, en bordure de l'affleurement calcaire dessiné sur la carte géologique.

28 mètres de Brenne au-dessus du calcaire, en boue jusqu'à 31 mètres. Sur les 28 mètres il n'a pas été rencontré de grès, mais des sables et une masse importante d'argile très blanche.

2. — *Migné* (centre Brenne)

a) Premier puits ancien, sur le champ de foire.

29 mètres de Brenne, essentiellement du grès.

b) Deuxième puits (puits de 45 mètres pour A. E. P.), sur la route Méobecq-Migné juste au dessus du bourg, à la limite de l'affleurement calcaire dessiné sur la carte géologique.

6 à 7 mètres de Brenne seulement (sables, grès, argile boueuse) sur calcaire corallien du Poinçonnet jusqu'à 17 mètres, puis callovien jusqu'à 37 mètres, puis bathonien.

3. — *Ruffec-le-Château*, sud de la Brenne, nord de la Creuse.

a) Dans la vallée sèche qui descend de la Muzardière. Poche de calcaire callovien rempli d'argile cénomanienne noire.

b) Puits de la Roche, limite de la commune de Ciron, nord Creuse. 30 mètres de Brenne.

4. — *Rivarennes*

Lavaud rive gauche de la Creuse, 50 mètres de Brenne sur calcaire bathonien.

5. — *Mézières-en-Brenne*, nord Brenne.

Immédiatement au nord de la Claise 5 à 6 mètres de Brenne sur Turonien.

6. — *Neuillay-les-Bois*, est Brenne, à la limite du Jurassique.

Puits au bourg, 25 mètres de Brenne.

7. — *Nuret-le-Ferron*, sud-est Brenne.

Les Perdreaux (route-Nuret-Chasseneuil), 36 mètres de Brenne, pas de grès.

II. — Puits et forages récents

1. — *Vendœuvres*

Fondations du château d'eau, nord Brenne, sur la butte (bourg).

A Vendœuvres, en bordure nord de Brenne, on se trouve précisément en plein cénomanien : l'étude de détail des fouilles pour les fondations du château d'eau (début décembre 1959) a permis de saisir l'origine des divers types de sols du nord de la Brenne et la raison de l'extrême hétérogénéité des profils à quelques mètres de distance :

Entre 0 *et* 2 *mètres.*

Sous une terre végétale un peu argileuse, riche en cailloux de quartz blanc roulés et exploités par les racines on trouve (fig 42) :

— des sables grossiers, mêlés de cailloux roulés enchâssés dans une argile grasse et collante donnant à l'ensemble une structure continue. Des poches de sable grossier pur, d'importance variable et à des niveaux également variables se trouvent dans la masse.

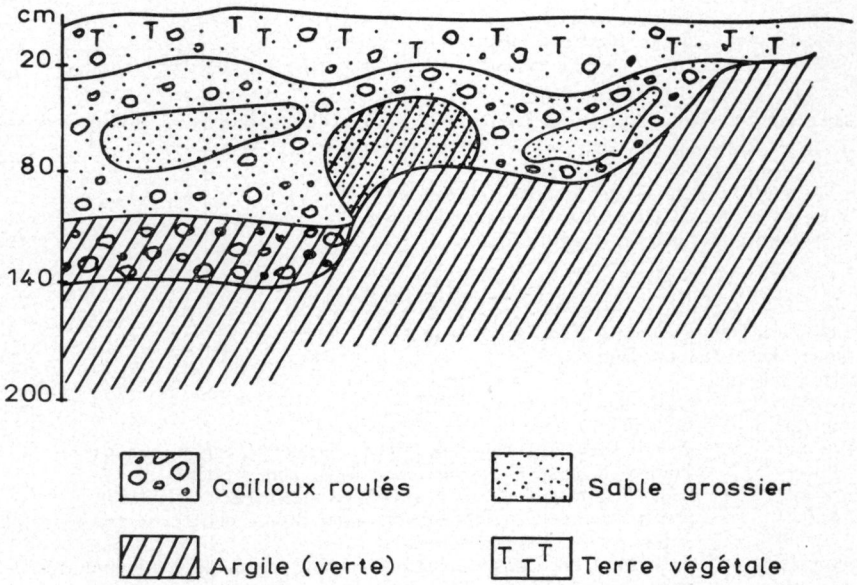


Fig. 42. — *Coupe des fondations du château d'eau de Vendœuvres*

— une argile sous-jacente vert pâle tachée d'ocre, à structure polyédrique très grossière affleure entre 20 et 140 cm.

De très vieilles souches se retrouvent jusqu'à 1,30 m. Le schéma ci-dessous représente les observations faites sur une largeur totale ne dépassant pas 5 mètres : il montre avec clarté la raison de l'hétérogénéité des sols de bordure nord de Brenne, à l'échelle même de la parcelle et fait saisir les difficultés de leur aménagement et de leur exploitation.

La « marmorisation » de tout le profil bien au-delà de la profondeur exploitée se retrouve dans tous les sols de Brenne et semble confirmer que l'hydromorphie est très ancienne, sans rapport avec les phénomènes généralisés de gleyification actuelle.

De 2 à 5 mètres.

L'argile plastique vert pâle ocrée par traînées fait progressivement place à un sédiment de même couleur, mais plus sablolimoneux enchâssant des petites masses arrondies de 1 à 2 cm de diamètre. Celles-ci sont formées d'une sorte de gaine blanchâtre très friable contenant de petits éclats de silex emboîtés les uns dans les autres. L'origine et le mode de dépôts de ces sortes de chailles restent à préciser. Plus on va en profondeur, plus ces masses s'aplatissent pour arriver à former des inclusions de silex engainées en bancs horizontaux de moins de 1 cm d'épaisseur sur 15-20 cm de long.

De 5 à 7 mètres.

On trouve une argile plastique limoneuse très fine, de la teinte gris fer caractéristique de certains dépôts cénomaniens : des sols de même type ont été trouvés dans ce secteur en contrebas par rapport à la fouille, à une altitude correspondante.

2. — *Rosnay*

Sondage de recherche en bordure nord de la route Migné-Rosnay à 500 mètres du bourg.

0-1,50 m	sable fin limoneux un peu argileux, beige.	
1,50 m — 7,50 m	sable gravillonneux quartz avec grains d'oxydes de fer. — sorti meuble du sondage, probablement consolidé mais friable.	grès non consolidé
7,50 m-10 m	grès de Brenne dur, blanc taché d'ocre avec nodule de fer. A grain très fin plus blanc vers la base.	grès peu argileux
10 m-11 m	même grès à grain plus grossier	
11 m-12 m	grain plus fin — *type La Bertellerie* et presque blanc	
12 m-17,30 m	grain plus grossier teinte plus ocrée	
17,30 m, 27 m	masse argileuse avec grains quartz de taille moyenne, ocre rose taché de blanc	grès plus argileux à argiles
21 m-24 m	d° plus ocré.	
24 m-25 m	argile plastique blanche très fine	argile
25 m-26 m	contact avec la calcaire bajocien (grain très fin, très dur, très imperméable).	

En résumé on retrouve toutes les formations éocènes (à l'exception du type bordure de Creuse) :

1 — les sables mal consolidés
2 — le grès grossier ocré, ferrugineux
3 — le grès très fin assez blanc (Bertellerie)
4 — les argiles sableuses marmorisées ocres ou roses
5 — les argiles blanches (La Binière),

3 — *Lys-Saint-Georges*

Bellegarde (sondage pour le B. R. G. G.) de 40 mètres.

Queue de Brenne, extrême est.

27 mètres de Brenne

0 à 1,50 m	argile ocre (non marmorisée)
1,50 m-1,90 m	sable gravillonneux à tendance rocheuse
1,90 m-5 m	grès de Brenne relativement tendre, marmorisé, ocre rose puis ocre jaune — à grain fin, apparaissant légèrement stratifié
5 m-15 m	même texture, mais sans stratification marmorisé ocre ou rose
15 m-27 m	grès de Brenne caractéristique du centre Brenne marmorisé, très rouge et plus ou moins concrétionné
27 m-30 m	présence de silex gris fumé et noir dans le grès caractéristique du remaniement du Bajocien
30 m-40 m	Argile gris pâle.

Annexe II

LE CLIMAT

Température

TABLEAU 1

Températures moyennes à Châteauroux de 1881 *à* 1955

Mois	Moyenne des 84 ans (degrés)	Moyennes	
		les plus basses (degrés)	les plus élevées (degrés)
J	3,4	— 2,2	7
F	4,6	— 2,8	9,4
M	7,5	3,8	13,6
A	10,7	7,4	15,9
M	14,5	8,9	17,1
J	17,9	14,8	20,0
J	19,9	17,6	23,3
A	19,5	17,0	23,4
S	16,8	13,5	21,2
O	11,7	7,2	15,6
N	7,2	3,3	10,8
D	4,1	6,4	7,7

Moyenne annuelle 11,5°

TABLEAU 2

Températures absolues minima et maxima à Châteauroux
(*Période* 1893-1955)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Minima ..	— 21,5	— 18,5	— 9	3,5	— 0,6	3,9	4,0	4,8	1,5	— 5,0	— 8,0	— 15,5
Maxima ..	18,3	22,0	28,0	31,5	34,5	37,7	40,2	40,5	38,0	30,0	24,5	20,3

TABLEAU 3

Nombre de jours de gelée (sous abri) (moyenne 1893-1955)

	minimum	maximum	moyenne
	—	—	—
Octobre	0	13	1
Novembre	0	16	6
Décembre	1	25	11
Janvier	1	28 (1945)	13
Février	2	28 (1942)	12
Mars	0	22 (1955)	8
Avril	0	8	2
Mai	0	1	0

On ne compte en moyenne que 12 jours par an de forte gelée (au-dessous de — 5°) de Novembre à Mars et 3 jours de très grands froids (au dessous de — 10°) en Décembre, Janvier, Février.

TABLEAU 4

Nombre de jours à température élevée (sous abri)
(période 1893-1955)

	Température supérieure à 25°			Température supérieure à 30°		
	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
M	0	1	0	0	0	0
A	0	11	2	0	2	0
M	1	16	4	0	7	1
J	5	19	9	0	8	2
J	7	28	16	0	24	6
A	1	30	15	0	20	5
S	1	25	8	0	17	1
O	0	10	1	0	0	0

TABLEAU 5

Écarts journaliers de température
Moyennes mensuelles (période 1946-1955)

	6 h	12 h	24 h
	—	—	—
Janvier	1,6	4,6	3,9
Février	1,9	6,1	5,3
Mars	3,7	10,8	10,3
Avril	6,3	14,9	14,6
Mai	10,0	17,4	17,3
Juin	13,3	20,6	21,1
Juillet	14,8	23,3	24,0
Août	14,1	22,8	22,5
Septembre	12,2	19,9	18,8
Octobre	7,4	15,1	13,2
Novembre	5,1	9,6	8,0
Décembre	3,2	6,0	5,2

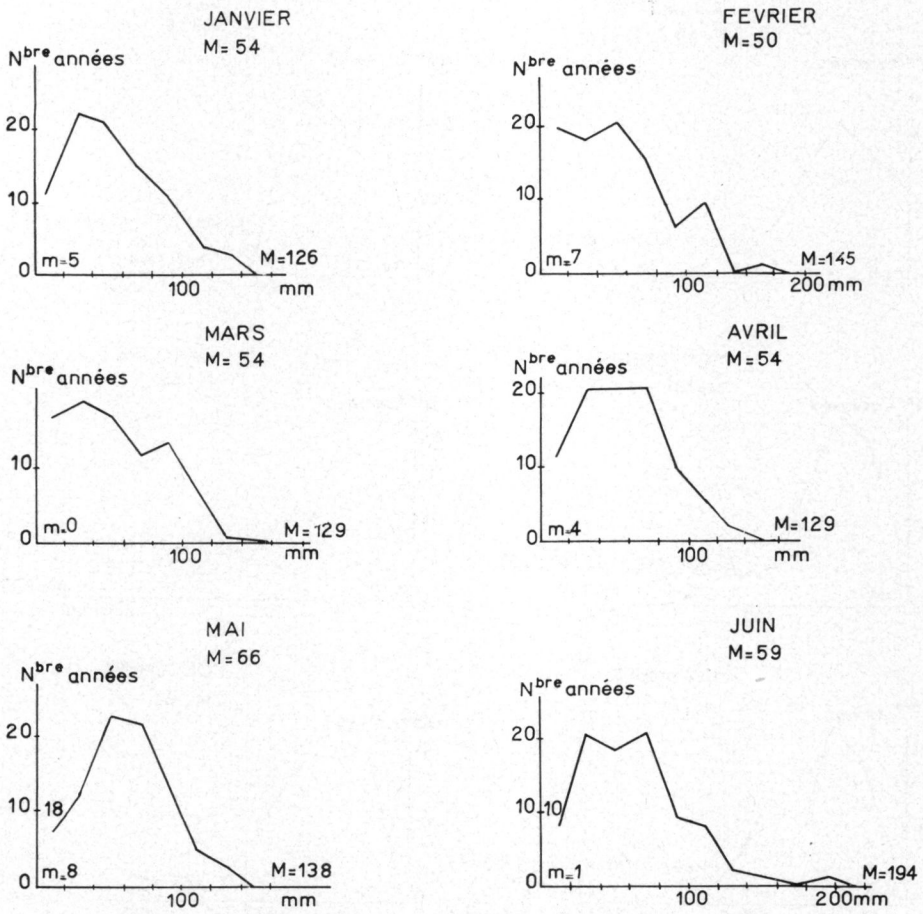


FIG. 43. — *Répartition des pluviométries mensuelles autour de la moyenne* M (*86 ans*)

(Moyenne M = chiffre inscrit sous le nom du mois correspondant)

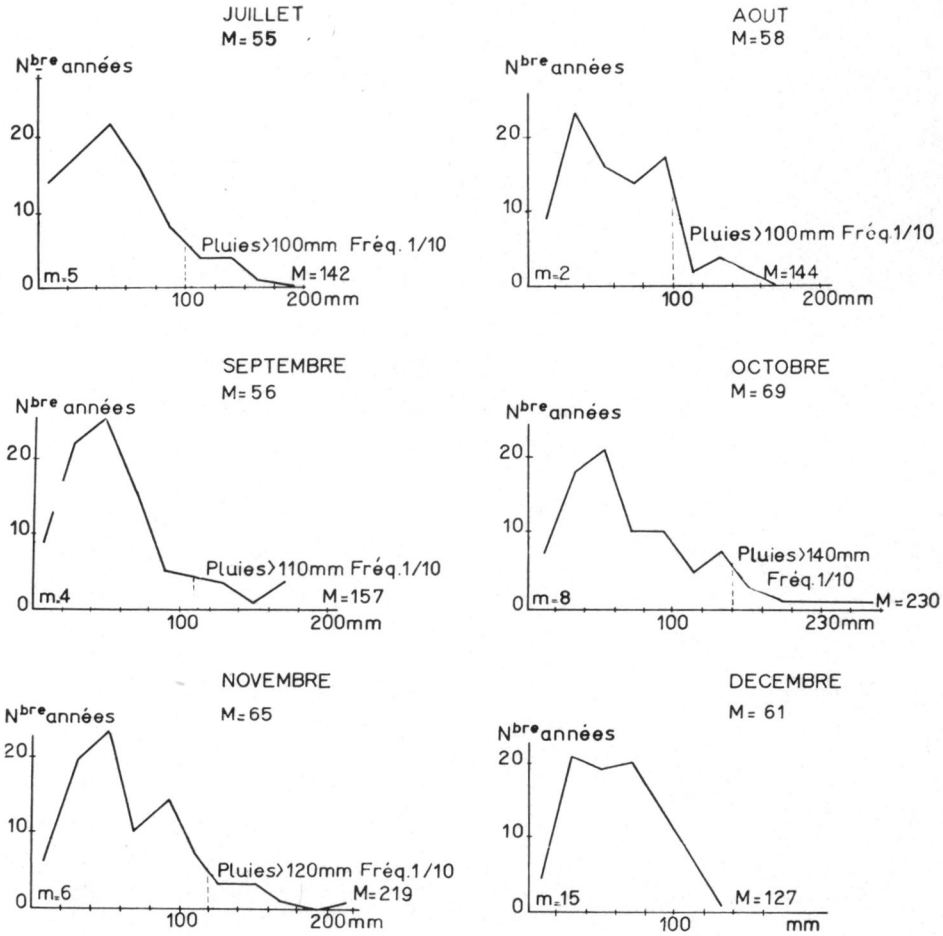


FIG. 44. — *Répartition des pluviométries mensuelles autour de la moyenne* M (*86 ans*)

(Moyenne M = chiffre inscrit sous le nom du mois correspondant)

Humidités relatives

TABLEAU 6

Humidités relatives—Moyennes mensuelles (1946-1955)

	à 6 h	à 12 h	à 18 h	Moyenne
Janvier	93	85	86	87
Février	92	77	79	82
Mars	90	64	68	74
Avril	88	56	58	70
Mai	90	59	61	76
Juin	90	61	60	74
Juillet	88	54	52	65
Août	90	57	57	70
Septembre	92	62	68	78
Octobre	93	69	77	82
Novembre	93	79	85	87
Décembre	93	86	88	89
			Moyenne....	78

TABLEAU 7

Humidités relatives—Moyenne des minima (1946-1955)

	à 6h	à 12h	à 18 h
Mars	91	52	53
Avril	86	45	53
Mai	90	50	57
Juin	87	49	51
Juillet	84	43	46
Août	89	48	50
Septembre	93	53	67

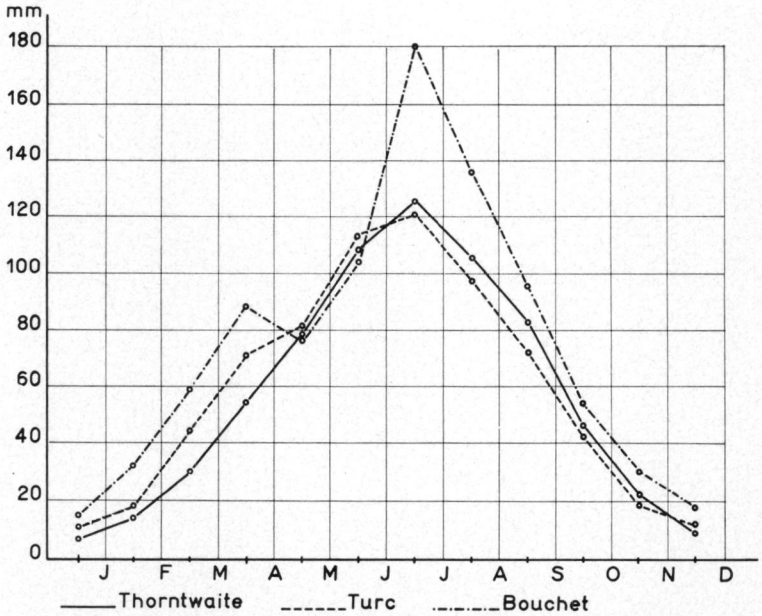


FIG. 45. — *Évapotranspiration potentielle Châteauroux* (*ETP moyennes mensuelles* 1945-1951)

TABLEAU 8

E. V. P. hebdomadaires pour 1945 *et* 1947 (*d'après* BOUCHET)

1945 juin	4 au 10	31,8	1947 juin	4 au 10	27,9
	11 au 17	29,1		11 au 17	29,1
	18 au 24	44,0		18 au 24	28,9
	25 au 1er	43,6		25 au 1er	42,8
juillet	2 au 8	42,4	juillet	2 au 8	48,3
	9 au 15	54,1		9 au 15	32,4
	16 au 22	61,2		16 au 22	39,0
	23 au 29	72,0		23 au 29	106,9
août	30 au 5	51,6	août	30 au 5	69,0
	6 au 12	37,7		6 au 12	26,8
	13 au 19	31,9		13 au 19	64,7
	20 au 26	38,5		20 au 26	33,2
	26 au 2	35,9		26 au 2	43,4

Annexe III

DOCUMENTS HISTORIQUES

I. — Extrait du rapport Dalphonse — 1805 : la Brenne a la fin du XVIIIe siècle

"Aucune plantation d'arbres dans cette contrée ; aucune eau courante ; quatre cent treize étangs couvrant une étendue de terrain d'environ 4 000 hectares ; point de montagnes, point de collines, point de coteaux ; seulement quelques monticules jetés çà et là, sans ordre et d'une très faible élévation.

Nul moyen à l'air pour se raréfier, et se décharger soit des vapeurs humides, soit des miasmes pestilentiels dont il s'imprègne en passant sur ces vastes réservoirs d'eau, et surtout sur ces cloaques fangeux... Ces miasmes s'insinuent, pénètrent, affectent non seulement tout ce qui a vie ; mais encore tout ce qui végète.

L'enfant sortant du sein de sa mère n'a pas encore contracté le germe des maladies qui l'attendent... ; mais est-il sevré, ses souffrances commencent, son teint devient basané, ses yeux se couvrent d'une teinte bilieuse ; il maigrit, il ne prend aucun développement... il n'atteint pas sa septième année. Franchit-il ce terme, il ne vit pas, il végète ; il reste empâté, opilé, cacochyme, boursouflé, hydropique, sujet à des fièvres putrido-malignes, à des fièvres d'automne interminables, à des hémorragies de dissolution, et à des ulcères aux jambes, d'une guérison très difficile.... les facultés s'abaissent, et communément l'âge de cinquante ans est le dernier terme...

Les animaux sont, dans cette contrée, d'une petite et faible complexion : ils sont rachitiques et peu vivaces.

L'herbe est courte et aigre ; les arbres, les arbrisseaux y sont rabougris,.... la nature elle-même semble souffrir ; elle semble consternée.

Le laboureur trace péniblement et tristement son sillon.... Tout est silence : on parcourt des lieues entières sans découvrir une habitation, sans apercevoir autre chose que des bruyères et des eaux, sans entendre aucun autre bruit que le choc des vagues et les cris perçants des hirondelles de mer.

Il est impossible de révoquer en doute..., que dans la Brenne l'air est vicié : mais il ne paraît pas qu'on soit également convaincu que ce sont les nombreux étangs qui contribuent à le vicier, et que leur desséchement soit un moyen de salubrité.

Il en a peu coûté à l'industrie de l'homme pour former ces étangs : la nature a presque tout fait, il n'a fallu que quelques digues pour la retenue des eaux et pour en grossir le volume. On en attribue la première origine aux moines qui, en 640, fondèrent les abbayes de Saint-Cyran, et de Méobecq ; ils cherchèrent dans le produit de ces étangs un moyen d'adoucir l'abstinence à laquelle ils s'étaient condamnés... Le désir de mettre à profit des terrains inféconds, les a ensuite multipliés. »

La mortalité avait alors d'effrayantes proportions : la vie moyenne était de 25 ans, alors qu'elle était ailleurs de 33 ans.

2. — Extrait du procès-verbal d'une séance du conseil général de l'Indre 1843 — les causes de la situation

« Les habitants de la Brenne sentant le besoin de remplacer cette vaste forêt par des terrains productifs défrichèrent quelques-unes de ses parties. On coupait le bois par le pied et on y mettait le feu. L'incendie s'étendait au loin. Les bruyères qui remplaçaient les arbres séculaires servaient de pacage aux troupeaux. Pour avoir du charbon, destiné au grand nombre de forges à bras, on

brûlait sans précaution des parties entières de bois, livrées ensuite au parcours — la stagnation des eaux, autrefois courantes, et arrêtées par les obstacles continuels que ces déboisements leur présentaient — la bruyère qui s'élève par de petites touffes formant autant de digues et l'eau ainsi engagée dans les bruyères y resta pour croupir. Ces réservoirs naturels se multiplièrent à l'infini. Les habitants, dirigés par les moines, entourèrent de chaussée les terrains en pente retenant les eaux et les empoissonnèrent. Les étangs s'étant multipliés et les bois étant submergés ou détruits, le pays devint de plus en plus malsain. »

3. — Mesures prises sous la Révolution

Par la loi du 14 Frimaire an II, les étangs de Brenne sont compris dans une mesure générale de desséchement avec clauses des plus rigoureuses : l'ordre de destruction des étangs était donné d'office à peine de confiscation en cas de retard au profit des citoyens non propriétaires.

La loi fut mal exécutée, des échecs retentissants ayant sanctionné les quelques efforts de cultures dans les anciens étangs motteux et asphyxiés.

La loi fut finalement rapportée dès 1795.

4. — Les grands travaux du 2e Empire

— *Les principaux cours d'eau* furent curés et aménagés dans le cadre de syndicats institués en vertu des décrets de 1853 : (Syndicats de la Claise, de l'Yoson, des Cinq-Bondes et du Suin supérieur) les travaux exécutés à l'entreprise de 1854 à 1859 portèrent sur 102 km — ils furent financés pour les 9/16 par l'État et le reste par le département et les propriétaires des vallées. L'État finança entièrement les travaux sur les vallées secondaires.

— *Le problème des étangs* (qui constituait à l'époque le plus clair des revenus de l'exploitant) ne pouvait pas être résolu par une mesure d'ensemble, mais par une série de cas particuliers échelonnés dans le temps : quelques-uns furent supprimés pour cause de salubrité publique par voie amiable avec indemnités, d'autresfurent asséchés de par la volonté même des propriétaires. Au fur et à mesure des curages d'eau des syndicats, les étangs traversés furent assujettis à avoir un déversoir et déchargeur de fond avec canaux convenables d'écoulement : l'État prit en charge les travaux d'ouverture de fossés des étangs situés sur les cours d'eau secondaires.

— *Les routes* : 224 kms de routes furent créées et entretenues pendant 5 ans par l'administration elle-même.

— *Encouragements et subventions* pour création de puits, abreuvoir, défriche de lande reboisement.

Annexe IV.

ANALYSE DES SILICATES D'ALUMINE

ARGILE — TERRE — ROCHE

I — *Préparation de l'échantillon*

— Doit être finement broyé (passant au tamis de maille 100 μ.)
— Séché à 102 °C pendant 2 heures.

II — *Perte au feu à* 1000 °*C*

— 500 mg d'échantillon
— Peser avant et après passage au four à 1000° C.

III — *Fusion alcaline*

— Porter à 400 °C 5 g de NaOH en creuset de nickel.
— Ajouter 500 mg échantillon.
— Mettre au four et maintenir à 400-430° C pendant 20 minutes.
— Mettre avec précaution le creuset chaud dans un bécher de 400 contenant de l'eau déminéralisée. Laisser en contact puis renverser le creuset et à l'aide d'une spatule dissoudre et détacher le culot du fond du creuset.
— Rincer le creuset puis ajouter 10 cc HCl concentré.

1° *Dosage de* SiO_2.

— Porter le bécher et son contenu sur le bain de sable.
— Avant évaporation complète ajouter du NO_3H pour oxyder les hydroxydes.
— Amener à sec et réduire en poudre fine.
— Mettre 3 heures à 105° C à l'étuve.
— Reprendre par 10 cc HCl concentré.
— Après quelques minutes ajouter 100 cc eau chaude, faire bouillir quelques instants.
— Filtrer immédiatement et bien nettoyer le bécher.
— Calciner le filtre à 600° C (ou plus) en capsule Pt de préférence.
— Peser (= SiO_2 + impuretés)

Élimination des impuretés

— Dans la capsule de Pt contenant SiO_2 calcinée et pesée, ajouter FH (réaction vive) et porter sur le bain de sable jusqu'à évaporation complète.
— Répéter l'opération.
— Calciner au four à 1000 °C.
— Peser la capsule à nouveau. (= impuretés)

2° *Dosage de la somme* $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + PO_4H_3 + TiO_2 + MnO$ (partiel)

— Ajuster à 250 cc le filtrat de la SiO_2.
— Prendre 125 cc dans un bécher de 250 cc.
— Ajouter 2 g $ClNH_4$.
— Porter à l'ébullition.

— En présence de rouge de méthyle neutraliser avec $NH_4O.H$
— Maintenir ainsi quelques instants à l'ébullition.
— Filtrer chaud.
— Redissoudre le précipité par HCl au 1/2.
— Précipiter une seconde fois dans les mêmes conditions.
— Joindre les 2 filtrats, ajuster à 250 cc.
— Calciner le précipité à 900-1 000 °C pendant 2 heures — peser.

3° *Dosage du* MnO_2.

— 25 cc du filtrat des hydroxydes.
— Porter au bain de sable et ajouter 10 cc HNO_3 et 5 cc H_2O_2 à 20 volumes.
— Évaporer à sec.
— Répéter plusieurs fois l'opération si nécessaire (Élimination du Cl et des sels ammoniacaux).
— Ajouter 10 cc PO_4H_3 à 85 %. Chauffer pour dissoudre. Refroidir.
— Ajouter 10 cc d'eau.
— Ajouter 0,2 g environ de périodate de sodium et chauffer jusqu'à apparition d'une couleur pourpre.
— Ajouter 75 cc d'eau et chauffer pendant 40 minutes ou plus.
— 0,1 g environ de périodate à nouveau ajouté vers la fin de la réaction.
— Ajuster à 100 cc.
— Établir la gamme dans les mêmes conditions à partir d'une solution de sulfate de manganèse RP de 0 à 1 mg de Mn.
— Colorimétrer au spectrophomètre à 500 mμ
— Multiplier le résultat obtenu par 4/3 pour tenir compte du coefficieut de partage MnO entre le précipité d'hydroxyde1 et le filtrat.

4° *Dosage du* Fe_2O_3 *total*

— 1 cc de filtrat SiO_2 (0,1 à 6 ppm Fe),dans un ballon de 25 cc.
— 1 cc d'hydroquinone à 1 p. 100 dans l'eau.
— 2 cc o phénanthroline à 0,25 p. 100.
— Ajuster à pH 3,5 au pHmètre à l'aide d'une solution de citrate de Na à 2,5 p. 100.
— Gamme de 0 à 150 γ Fe dans 25 cc à partir d'une solution d'alun de Fe RP.
— Attendre 1 heure.
— Colorimétrer au spectrophomètre à 500 mμ

5° *Calcul de* Al_2O_3.

— On déduit de la somme des hydroxydes calcinés (§ 2) la quantité de Fe_2O_3 dosé à l'orthophénanthroline et éventuellement $P_2O_5 + TiO_2$ (à négliger dans les argiles).

IV — *Attaque* — FH — ClO_4H *et* SO_4H_2.

— 300 mg d'échantillon en capsule de Pt.
— Mouiller par quelques gouttes d'eau.
— Ajouter 1 cc ClO_4H et 5 cc FH à 48 p. 100.
— Amener à sec.
— Répéter l'opération.
— Ajouter 2 cc H_2SO_4. Amener à sec.
— Reprendre par 5 cc HCl au 1/2 chaud.
— Ajouter de l'eau chaude au 2/3 de la capsule.
— Faire bouillir doucement pour dissoudre.
— Transvaser en ballon de 100 cc. Ajuster = Solution A.

1° *Dosage du* K *et* Na

— Faire une dilution au 1/5 de la solution A ou plus si nécessaire.
— Dosage au photomètre à flamme.
— Gamme avec solutions de 0 à 10 mg de K ou de Na par litre.

2° *Dosage de* Ca *et* Mg

α) *Élimination des hydroxydes.*

— 50 cc de la solution A.
— 3 gouttes de pourpre de bromocrésol.

— 1 g NH_4Cl.
— Chauffer jusqu'à ébullition.
— Neutraliser avec NH_4OH 4N (40 p. 100).
— Ajouter 2 cc NH_4OH 4N.
— Oxyder Mn (pour qu'il précipite) avec de l'eau de brome, ce qui décolore aussi l'indicateur.
— Faire bouillir et ajuster à 100 cc, laisser décanter ou centrifuger.

β) *Dosage du* Ca + Mg.

— 25 cc du liquide surnageant.
— 2 cc KCN à 1 p. 1000.
— noir d'ériochrome (0,5 g de noir d'éricchrome pour 25 g KCl finement broyé).
— 5 cc tampon pH 10,1 (67,5 g NH_4Cl + 570 cc NH_4OH concentré pour 1 000).
— Titrer à la micro-burette avec du versenate N/100 en agitant à l'aide d'un agitateur magnétique.

γ) *Dosage du* Ca

— 25 cc du liquide surnageant des hydroxydes en erlen de 150.
— Ajouter 10 cc HNO_3. Porter sur le bain de sable. Amener à sec
— Répéter l'opération si nécessaire (élimination des sels ammonaicaux).
— Reprendre par 25 cc HCl 0,4 N.
— 5 cc KOH à 10 % (donne pH 12.)
— 2 cc KCN à 1 pour 1 000.
— Murexide (0,2 g purpurate d'NH_4 et 40 g K_2SO_4 finement broyé).
— 5 cc versenate N/100.
— Titrer en retour par une solution de Ca N/100 (Cl_2Ca préparé à partir de CO_3Ca RP) à la micro-burette et à l'aide de l'agitateur magnétique.

Annexe V.

COORDONNÉES LAMBERT

DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS CITÉS DANS LE TEXTE.

Chapitre	pages	Niveau ou n° de prélèvement	Lieu-dit	Commune	Coordonnées Lambert	
					X	Y
Exemples d'hétérogénéité ..	46		Claise	Mézières	519	199
			Les Brandes	Ciron	517	184
			Tournavaux	Migné	521	188
			La Poupetterie	Saint-Michel	516	196
Étude des Roches						
1) Analyse totale	54		La Plaine Ronde	Ciron	515	183
			La Bertelierie	Martizay	503	199
			Puits AEP	Méobecq	529	193
			Claise	Mézières	519	199
			Les Fourdines	Ciron	514	185
			La Roche	Mézières	516	202
2) Lames minces	55		Claise	Mézières	519	199
			La Prêle	Mézières	514	202
			La Roche	Mézières	516	202
			Château d'eau	Vendœuvres	525	200
			La Bertellerie	Martizay	503	199
			Puits AEP	Méobecq	529	193
			La Plaine Ronde	Ciron	515	183
Étude des Argiles	56 et 75	horizon A_1	La Bertellerie	Martizay	503	199
1) Rayons X (et surfaces, capacité échange, analyses totales).....		— B				
		— C				
		horizon A	La Saboterie	Vendœuvres	525	199
		B				
		grès				
		horizon A_1	La Plaine Ronde	Ciron	515	183
		A_2				
		B-C				
		horizon C	Les Brandes	Ciron	517	184
		argile verte	La Roche	Mézières	516	202
2) Surfaces, capacités d'échange, analyses totales .	— d° —	horizon 0-20	La Prêle	Mézières	514	202
		— 40-60				
		— 1m20				
		horizon A_1	La Claise (type a)	Mézières	519	199
		A_2				
		B				
		horizon A_1	La Claise (type c)	Mézières	519	199
		A_2				
		B				
		horizon A_1	Baudrussais	Lingé	506	197
		A_2				
		B-C				

(suite)

Chapitre	pages	Niveau ou n° de prélèvement	Lieu-dit	Commune	Coordonnées Lambert X	Coordonnées Lambert Y
		horizon A_1 A_2 B-C	Le Chatelier	Saint-Maur	544	196
		horizon A — B	Les Terres d'Azay	Ciron	518	183
Étude des Sables	56	tous les horizons	La Prêle	Mezières	pour mémoire	
			La Roche	—		
			Claise	—		
			La Bertellerie	Martezay		
			Le Chatelier	Saint-Maur		
			Baudrussais	Linge		
			Les Brandes	Ciron		
			La Saboterie	Vendœuvres		
			La Plaine Ronde	Ciron		
			La Métairie	Ciron	518	180
			La Biénaise	Mézières	513	201
			La Poupetterie	Saint-Michel	516	196
Courbes granulométriques	59 à 70	605	La Claise	Mézières	519	199
		39	Chantepie	Migné	520	188
		91	La Chapelle Saint-Sulpice	Vendœuvres	528	197
		21	Pré-Pissou	Mézières	514	204
		14	Terres de Brandes	Ciron	517	184
		41	Huchemouche	Migné	520	193
		2	Le Bois-Latour	Ciron	514	182
		35	Route Luant	Méobecq	531	193
		64	Le Maupas	Rosnay	512	193
		450	la Plaine Ronde	Ciron	515	183
		166	Les Grades-Bruyères	Luant	543	191
		68	Claise (sud route)	Mézières	519	199
		55	Route Saint-Gaultier	Migné	523	187
		101	Forêt Lancosme	Vendœuvres	528	197
		65	Le Temple	Rosnay	512	195
		20	Touchain	Mézières	515	203
		61	Sommet anticlinal)	Rosnay	513	190
		615	La Roche	Mézières	516	202
		A 975	La Biénaise	Mézières	513	201
		6	Le Breuil	Ciron	516	182
		11	La Métairie	Ciron	519	180
		12	La Métairie	Ciron	—	—
		18	Les Terres-d'Azay	Ciron	518	183
	86	16	Le Champ-de-Migné	Ciron	517	182
		A 27	La Bertellerie	Martizay	503	199
Étude de comportement	99 à 130		La Poupetterie	Saint-Michel	516	196
			La Biénaise	Mézières	513	201
			La Roche	Mézières	514	202
			Claise type *c*	Mézières	519	199
			Claise type *a*	Mézières	—	—
			La Bertelerie	Martizay	503	199
			Les Brandes	Ciron	517	184
			La Plaine Ronde	Ciron	515	183

QUELQUES VUES DE LA BRENNE

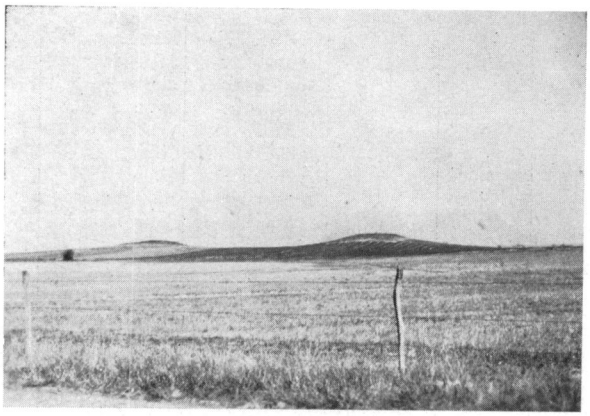


Photo 1. — *L'arête anticlinale : les grands « butons »*

Photo 2. — *Pied de l'arête anticlinale : le grand étang de Migné et les petits « butons »*

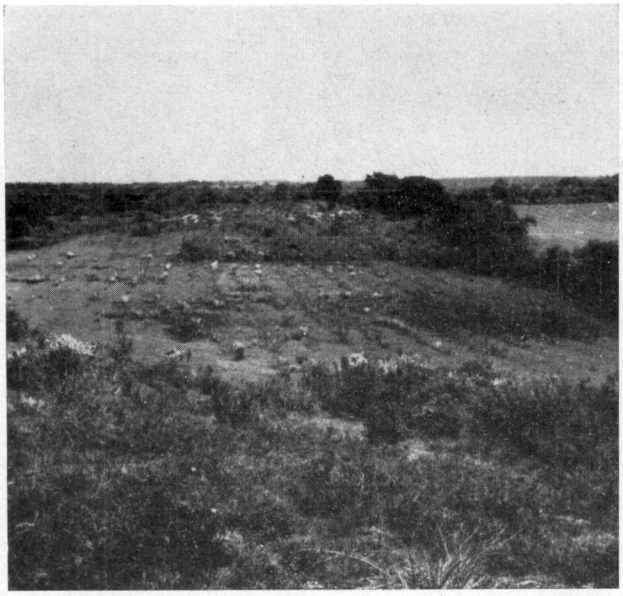


Photo 3. — *Centre Brenne : pacages sur lande*
Remarquer les lignes de jonc, trace des anciennes planches dans le sens de la pente.

(*photo S. C. P. A.*)

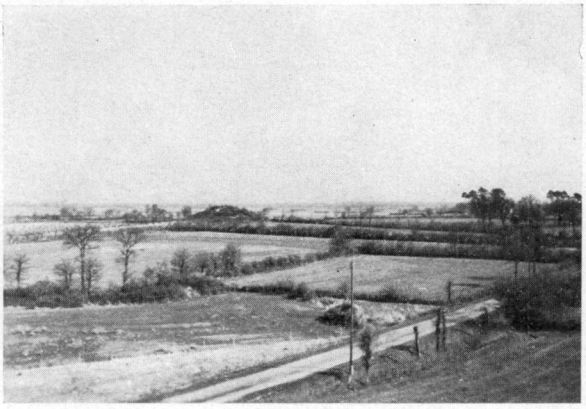


Photo 4. — *Centre Brenne : zone de « culture »*
A l'arrière-plan, un buton au-dessus d'un étang.
Aux premiers plans, les parcelles en pacage.

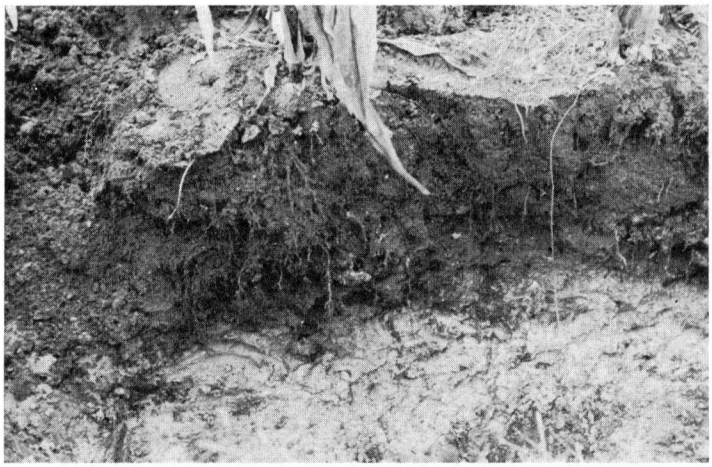


Photo 5. — *Sol d'apparence podzolique sous maïs à maturité* (*La Claise*)
Noter la limite nette entre l'horizon superficiel humifère bien occupé par les racines et l'horizon blanchi hydromorphe, à structure cimentée, non exploité.

Photo 6. — *Prairies temporaires* (*fétuque des prés, trèfle blanc de 2 ans*) *sur sol à tendance battante et apparence podzolique, drainé, recalcifié, fumé et nettoyé,* (*La Plaine Ronde, mai* 1962)
Au premier plan, 2e coupe en cours de repousse.
En second plan, au moment de la 1re coupe plus tardive.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.* 161-172.

AUBERT G., DUCHAUFOUR Ph., 1956. Projet de classification des sols. *VIe C. I. S. S.* Paris, V, 97, vol. E. 597-604.

AUBERT G., HÉNIN S., 1945. Relation entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C. R. Acad. Sci*, **220**, 230-232.

BARSHAD, I., 1958. Soil Development 1-52 : *Chemistry of soils. Ed. Firman E. Bear.* New Jersey.

BÉTRÉMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer ét du manganèse dans les sols. *Ann. agron*, 193-295.

BÉTRÉMIEUX R., GOBILLOT Th., 1960. La pédologie et les problèmes d'assainissement. *C. R. Acad. Agric*, **9**, 490-493.

BLANCHET R., 1959. Energie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. *Ann. agron.*, 5-52 ; 125-153 ; 267-304.

BLANCHET R., PÉRIGAUD S., 1960. Sur l'appréciation du niveau des réserves potassiques des sols ; possibilité d'utilisation d'un test MORGAN-BARBIER amélioré. *Ann. agron*, 349-357.

BLANCHET R., PÉRIGAUD S., CHAUMONT C., NADEAU J. C., 1960. Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols. *Ann. agron.*, 621-650.

BLOOMFIELD C., 1949. Gleying. *Soils and fertilizers.* XII, 5. 319-322

BOUCHET R. J., 1959. Évapotranspiration et évaporation sous abri. *Coll. sur zones arides, Congrès* UNESCO, Madrid, sept.

BOURRIER J., 1954. Mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols à la Station Expérimentale d'Hydraulique agricole (Vergières). *Ann. Génie Rural*, **74**, 3-25.

BRAJNIKOV B., FRANCIS-BEUF C., ROMANOVSKY V., 1943. Techniques d'études des sédiments. *Actualités scient. et industriel.*, 952 Herman Cie Ed. Paris, 110 p.

BRYSSINE G., 1953. Notion de pédologie appliquée — méthodes d'analyses *Rech. Agr. et Exp. Agr.*, Rabat, 98 p.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1958. Méthode d'utilisation des résultats de l'étude chimique d'une roche argileuse en en vue de la détermination de sa composition minéralogique. *B. Groupe Franç. Arg.*, **10**, 61-70.

CAILLEUX A., 1942. Les actions périglaciaires en Europe. *Sté Géol. France*, 42 p.

CAMPBELL R. B., 1952. Freezing point of water in puddled and unpuddled soils at different soil moisture tension values. *Soil Sci*, **73**, 221-229.

CHILDS E. C., 1942. Stability of clay soils. *Soil Sci*, **53**, 239-252.

CHILDS E. C., YOUNG E. G., 1958. The use of moisture characteristic curves in assessing the soil stability of opencast coal sites. *Symp. Intern. Structure, Gand*, 415-421.

COMBEAU A., 1960. Observations sur certains facteurs de la rétention de l'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables de pF. Application à quelques types de sols tropicaux. *O. R. S. T. O. M.*, Service Cartographique de l'Orstom. Paris Décembre.

CROMPTON E., 1952. Some morphogical features associated with poor soil drainage. *J. Soil Sci*, **3**, 277-289.

CRONEY D., COLEMAN J. D., 1954. Soil structure in relation to soil suction (pF) *J. Soil Sci*, 75-84.

DAUTRY, 1956. L'évolution morphologique de la Brenne. *Revue Norois*, avr. juin.

DEMOLON A., 1926. Recherches physicochimiques sur la terre à briques envisagée comme milieu naturel. Thèse Paris.

DEMOLON A., 1952. La dynamique du sol. 5e édition, Dunod, 520 p.

DHARIVAL A. P. S., STEVENSON F. J., 1958. Détermination of fixed ammonium in soils. *Soil Sci*, **86**, 343-349.

DROUINEAU G., GOUNY P., 1947. Contribution à l'étude de l'azote nitrique par la méthode Dewarda. *Ann. agron*, 154-164.

DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, 518-536.

DUCHAUFOUR Ph., 1957. Note sur le rôle de la matière organique dans les phénomènes de lessivage et de podzolisation. *C. R. Acad. Sci*, **245**, 1154-1155.

DUCHAUFOUR Ph., 1960. Précis de Pédologie. Masson et Cie, 438 p.

DUPUIS J., 1952. Contribution à l'étude des sols du Gâtinais. Thèse. *Ann. I. N. A.*, **39**, 256 p.

DYAL R. S., HENDRICK S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as characteristic index. *Soil Sci*, **69**, 421-432.

FACON R., 1956-1957. Formations résiduelles des surfaces d'érosion tertiaires dans le seuil du Poitou. *Revue Géogr. Ouest*, Norois, Poitiers, 1956 : 12, 365-387 ; 1957, 1, 46-64.

FEODOROFF A., 1958. Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau. *Ann. agron*, 537-548.

FEODOROFF A., 1961. Capacité de rétention pour l'eau et structure du sol. *C. R. Acad. Sci*, **252**, 4, 591-593.

FEODOROFF A., 1961. Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. *C. R. Acad. Agric*, **47**, 164-167.

GOUNY P., MÉRIAUX S., 1960. Importance de l'ion NH_4 à l'état non échangeable dans un profil de sol. *C. R. Acad. Sci*, **251**, 1418-1421.

GUYON G., 1962. Quelques considérations sur la théorie du drainage et premiers résultats d'expérimentation. *Bull. Techn. Génie Rural*, 52.

GUENNELON R., 1959. Analyses des silicates d'alumine. *Ann. agron.*, 77-98.

HALLAIRE M., 1958. Les réserves en eau du sol et leur utilisation par la plante. 5e *Congr. Int. Génie Rural* Bruxelles, **1**, 227-249.

HALLAIRE M., 1959. La diffusion de l'eau dans le sol et l'alimentation hydrique des plantes annuelles. *Bull. Soc. Fr. Phys.*, **5**, 133-140.

HALLAIRE M., HÉNIN S., 1958. Sur la non-validité de l'équation de conductivité pour exprimer le mouvement de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sci*, **248**, 1720-1722.

HASHIMOTO I., JACKSON M. L., 1960. Rapid dissolution of allophane and Kaolinite-holloysite after dehydration. *Clays and clay minerals*, 102-113.

HÉNIN S., TURC L., 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric*, **14**, 597-598.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 73-92.

HENIN S., FEODOROFF A., 1958. Sous-solage et drainage-taupe. *Ann. agron*, 565-589.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. Le profil cultural. Principes de physique du sol. *S. E. I. A.* Paris. 320 p.

JACKSON L., 1958. Soil chemical analysis. *Prentice Hall Inc.* 498 p.

JURAN, 1960. The influence of Lucerne and Lucerne-grass mixture on the improvement of the soil structure. *(Rés. angl.) Pol nohospodarstvo.*, 608-616.

KIRKHAM D., de BOODT M., de LEENHEER L., 1958. Air permeability at the field capacity as related to soil structure and yields. *Symp. Int. Structure, Gand*, 377-391.

KUIPERS H., 1961. Water content at pF 2 as a characteristic in soil cultivation research in the Netherlands. *Neth. J. Agric. Sci*, **9**, 27-35.

KLEIN C., 1961. Sur la « formation de la Brenne » et ses extensions en Montmorillonnais et Châtelleraudais. *C. R. Acad. Sci*, **253**, 2087-2089.

LAPADU-HARGUES, 1957. Méthodes d'analyse des roches. *Trav. Lab. Géol. Minéral. Fac. Sc. série Docum.*, **7**, 33 p.

LECOMPT M., 1959. Tests rapides pour le contrôle sur le terrain de la nutrition minérale des plantes cultivées. *C. R. Acad. agric*, **45**, 802-810.

LEMEE M. G., 1959. Le bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. *Bull. Sté Fr. Physiol. Vég*, **5**, 118-132.

LOSSAINT P., 1959. Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Thèse Fac. Sci.* Strasbourg, 17, 3. *Ann. agron.*, 369-414, 493-542.

LUTHIN J. N., 1957. (éd.) Drainage of Agricultural Lands. Madison, Wisconsin. 620 p.

MAZOYER R., 1954. Possibilités d'emploi du versénate pour le dosage du calcium et du magnésium échangeables dans les extraits de sols. *Ann. agron.*, 1009-1016.

MEHRA O. P., JACKSON M. L., 1958. Iron oxyde removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals.*

MEHRA O. P., JACKSON M. L., 1959. Specific surface determination by duo-interlayer and mono-interlagner glycerol sorption for vermiculite and montmorillonite analysis. *Soil. Sa. Soc Amer. Proc*, **23**, 351-354.

MÉRIAUX S., 1954. Étude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon, granulométrie. *Ann. agron.*, 985-993.

MÉRIAUX S., 1957. L'analyse granulométrique par densimétrie. *A. F. E. S.*, **90**, 928-941.

MÉRIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad., Agric.*, **44**, 800-803.

MILLOT G., 1949. Relations entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses. *Géologie appliquée et prospection minière*, Nancy, 2, 3, 4, 11-352.

MONNIER G., 1957. Influence de la prairie temporaire sur la structure d'un sol de limons. *C. R. Acad. Agric.*, **43**, 227-230.

MONNIER G., 1958. Influence du mode d'exploitation des prairies sur la profondeur de leur enracinement. Incidences sur l'amélioration de leur enracinement. Incidences sur l'amélioration de la structure et de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric*, **44**, 388-392.

NADEAU J. C., 1961. Évaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange d'argiles. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 162-163.

PAYNE D., 1954. Some factors affecting the beackdown of soil crumbs on rapid wetting. 5e *C.I.S.S.*, Léopoldville, **2**. 53-58.

PELTIER R., 1955. Manuel du laboratoire routier. Dunod, 2e édition, 288 p.

PETERSON J. B., 1946. The role of clay minerals in the formation of soil structure. *Soil Sci*, **6** 2471,-255.

PLAISANCE G., 1956. Les sols à simili-gley. *A. F. E. S.*, **73**, 392-416.

PLAISANCE G., Van der MAREL H. W., 1960-1961. Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux, Jura (Sols à simili-gley et marmoroïdes). *Ann. agron.*, **11**, 601-620, 661-711 ; **12**, 249-261.

RICHARDS L. A., WEAVER L. R., 1944. Moisture retention by some irrigated soil as related to some moisture tension. *J. Agr. Res.*, **15**, 69.

RIVIÈRE A., 1953. Méthode d'interprétation de la granulométrie des sédiments meubles. *Revue I. F. P.*, n° spécial, 102-107.

ROBELIN M., 1960. Incidence du niveau de la nappe sur l'alimentation en eau des plantes. *Bul. Techn. Génie Rural*, H. S. 41, 7.

ROBICHET O., 1957. Recherches sur les oxydes de fer et manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, **9**, 511-572.

RODE A. A., 1956. Catégories et formes de l'eau du sol et les propriétés hydrodynamiques des sols. *VI°. C. I. S. S.* Paris, vol. B, 135-147.

SIUTA J., 1960. Preliminary investigations of the gleying processes in the alluvial soils of Zuhawy. (En pol. ; rés. angl.) *Roczn. Nauk Rol*, **82 A**, 45-72.

STEINBERG M. 1960 Utilisation de la mesure de radioactivité naturelle dans l'étude du sidérolithique du Poitou. *C. R. Acad, Sci*, **251**, 3022-3024.

STEINBERG M., 1961. Nature minéralogique de la fraction argileuse des sédiments sidérolithiques et des argiles de décalcification de la feuille de Poitiers. *C. R. Acad. Sci*, **253**, 148-151.

STUDER R., 1961. Méthode de détermination des réserves hydriques des sols. *Ann. agron.*, **12**, 599-608.

THORNTWAITE C. W., 1948. An Approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* **38**, 55-94.

TOTH S. J., ALDERFER R. B., 1960. Formation and beackdown of Co ^{60} tagged water stable aggregates in a Norton silt loam soil, *Soil Sci*, **90**, 232-238.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 5-49.

VATAN A., 1947. La sédimentation continentale tertiaire dans le bassin parisien méridional. *Thèse Fac. sc. Univ.* Paris.

VERIGINA K. V., 1953. Characteristics of the processes of gleying in soil (en russe ; rés. angl.) *Trud. Pochvov. Inst. Dokuck*, **41**, 198-252.

X, 1959. Méthode du trou de tarière. *Bull. C. R. E. G. R. Génie Rural.*, **32**, H. S. (Section T. Hydr.).

WOLKOWITCH M., 1958. La forêt de Châteauroux et la forêt de La Leuf. *Revue Norois*, 19 bis.

ZAKOSEK H., 1954. The recognition of pseudogleys (en all.) *Z. Pflirnähr. Dung.*, **65**, 27-31.

Le Directeur-Gérant : M. L. Cagnac

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 22-5-1963.

Dépôt légal : 2e trimestre 1962. *N° d'impression :* 626.

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 381-391.

POTENTIEL MATRICIEL DE L'EAU DANS LE SOL ET TENSION SUPERFICIELLE DE L'EAU

M. HALLAIRE et Ch. BALDY
Station centrale de Bioclimatologie agricole,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

L'objet de cet article est de vérifier la conformité d'une nouvelle représentation où la capillarité n'intervient plus seule et où l'on envisage l'action du solide sur l'eau pelliculaire. Les résultats expérimentaux montrent que l'allure des phénomènes correspond aux images théoriques proposées et que la tension superficielle joue bien le rôle particulier qui lui est attribué. Cela ne justifie pas définitivement les théories proposées qui ne tiennent pas compte explicitement des cations échangeables ; mais celles-ci constituent actuellement une approximation correcte qui ouvre la possibilité, dans des études ultérieures, d'introduire comme complément les facteurs qui n'ont pas été considérés en détail.

Le potentiel matriciel de l'eau dans le sol, également appelé potentiel capillaire, est mesuré maintenant de façon courante et est exprimé, du point de vue thermodynamique, à l'aide d'équations devenues classiques. Par contre, l'arrangement de l'eau dans le sol, la nature des différents phénomènes physiques, phénomènes capillaires, phénomènes d'adhésion ou autres, responsables de ce potentiel et cela dans les diverses gammes d'humidité, n'ont pas à notre avis retenu toute l'attention qu'ils méritaient.

Nous avons tenté dans ce travail de rappeler les théories et hypothèses émises pour expliquer l'existence de ce potentiel. D'autre part, nous nous sommes efforcés, en agissant sur la tension superficielle de l'eau, de distinguer, selon le taux d'humidité, l'importance respective des phénomènes de capillarité et des autres actions physiques.

I — GÉNÉRALITÉS SUR LE POTENTIEL MATRICIEL DE L'EAU DANS LE SOL

Ce potentiel peut être défini comme l'énergie nécessaire pour extraire du matériau l'unité de masse de liquide et la porter à l'état d'eau libre, à la même hauteur, la même température et sans modification de concentration saline ni par conséquent de pression osmotique.

Ainsi défini, ce potentiel est alors positif. Si au contraire, il avait été défini comme l'énergie fournie par l'eau au cours de la transformation indiquée, il serait négatif. Il résulte de la définition rapportée ici, que l'eau a tendance à se déplacer de façon que son potentiel augmente puisque c'est alors qu'elle cédera spontanément de l'énergie.

Les différents termes du potentiel peuvent être décomposés de la façon suivante :

a) Si l'eau est soumise à des actions capillaires qui lui confèrent une pression P, le travail à dépenser pour porter V (cm^3) d'eau à la pression nulle est

$$\zeta_1 = V[o - P] = - VP.$$

La pression P étant normalement négative, étant donné la concavité du ménisque, il s'agit bien d'un travail positif.

b) Si un autre phénomène que la capillarité (pression de coin de DERJAGUIN par exemple) impose à l'eau du sol une pression supplémentaire P′, on devra de même effectuer un travail

$$\zeta_2 = - VP'$$

pour porter l'eau à la pression nulle.

c) Si les sels non solubles adsorbés par le sol conduisent à un accroissement de pression osmotique P″, l'action de ces sels conduit à compter un supplément du travail

$$\zeta_3 = - VP''$$

qu'il est logique d'inclure dans le potentiel matriciel si l'on considère comme un tout le sol en tant que support et les sels adsorbés.

d) On peut avoir enfin à effectuer un travail

$$\zeta_4 = w$$

autre que celui contre la pression, travail contre des forces d'adhésion par exemple.

Le potentiel matriciel, somme de ces énergies, sera

$$\psi = - V[P + P' + P''] + w. \qquad (1)$$

On verra plus loin que si le potentiel est exprimé par la formule générale (1), il peut n'être dû qu'à un effet de capillarité ($\psi = VP$) en tel point du liquide, et en tel autre point, à un effet d'adhésion ($\psi = w$). Mais l'équilibre d'humidité dans un sol (abstraction faite des autres potentiels, c'est-à-dire à hauteur, à température et à concentrations salines identiques) suppose que le potentiel matriciel tel qu'il est exprimé dans l'équation générale (1) ait partout la même valeur.

Les mesures de potentiel comme l'extraction de l'eau sous pression ou l'hygroscopicité donnent globalement la valeur de ψ mais ne permettent pas de faire la part des différentes composantes du potentiel. Rien n'empêche alors de poser

$$\psi = - VP_s$$

P_s, tension de l'humidité du sol, pression de succion ou succion matricielle doit alors être considérée comme une pression équivalente qui conduirait au même potentiel que celui qui a été mesuré.

Le tableau suivant dû à TAYLOR et indiquant la correspondance entre les valeurs de ψ et celles de P_s selon le système d'unités employé, montre qu'en fin de compte il importe peu de parler de potentiel matriciel ou de pression de succion quand on s'est entendu sur le sens exact à donner aux mots.

TABLEAU I

Potentiel de l'eau			Tension (ou succion) équivalente si V = 1 cm³/g		
g · cm/g	ergs/g.	Joules/kg	g/cm²	millibars	atm.
1	980	0,098 0	1	0,980	0,000 97

Quels sont par contre les rôles joués respectivement par les effets d'adhésion ou la pression de coin de DERJAGUIN? C'est ce que nous avons cherché à préciser en modifiant la tension superficielle de l'eau, tension qui n'intervient que sur les phénomènes de capillarité proprement dite, et ce que nous allons tenter d'analyser maintenant.

II — ÉTAT DE L'EAU DANS LE SOL ET ORIGINE DU POTENTIEL MATRICIEL

Les travaux des auteurs russes (DERJAGUIN, 1955 ; DERJAGUIN et coll., 1956) en particulier amènent à se représenter de la façon suivante la répartition de l'eau dans le sol.

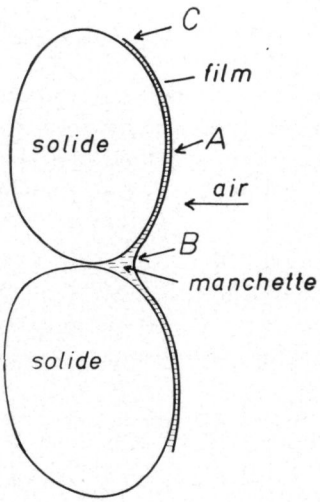


FIG. 1

En des points tels que A (fig. 1) où les particules solides présentent une face à peu près plane, l'eau s'étale sous forme d'un mince film dont l'épaisseur h augmente bien entendu avec le taux d'humidité H.

Par ailleurs, en des points tels que B (fig. 1), là où la géométrie du milieu obligerait les films à se rejoindre en formant un certain angle, il se forme de petites accumulations d'eau appelées manchettes et délimitées par un ménisque.

1 — *Potentiel matriciel* ψ_1 *au niveau des films*

L'origine du potentiel matriciel au niveau des films a été expliquée à partir de deux théories : la théorie de DERJAGUIN selon laquelle l'eau serait soumise dans les films à une pression négative et la théorie de l'adsorption.

a) *Pression intrafilmaire de* DERJAGUIN.

Cet auteur a montré qu'à l'intérieur d'un film liquide d'épaisseur h, il existe une pression négative (P) identique en tout point. Il y a donc discontinuité brutale de pression de l'extérieur à l'intérieur du film.

Cette pression proviendrait des forces de répulsion que les deux surfaces limitant le film exercent l'une sur l'autre. Elle ne résulterait pas d'une action physique de la paroi et serait donc la même, que le film repose sur un solide ou non.

DERJAGUIN qualifie cette pression de « pression d'écartement » ou « pression à effet de coin » ce qui traduit la tendance du film à écarter les particules solides entre lesquelles il s'insère.

La valeur absolue P de la pression en question est d'autant plus grande que l'épaisseur h du film est faible. Pour les sols dont les particules sont entourées d'une atmosphère ionique d'épaisseur d, DERJAGUIN a établi expérimentalement les formules

$$P = ah^{-3} + bh^{-2} \quad \text{si} \quad h > d \tag{2}$$

et

$$P = ah^{-3} + ce^{-2h/d} \quad \text{si} \quad h < d \tag{3}$$

a, b, c, étant des constantes et e la base des logarithmes népériens.

En des points du liquide tels que le point A représenté fig. 1, où la surface de séparation air-eau est plane, la pression définie ci-dessus sera seule responsable du potentiel de l'eau et ψ (en g · cm par g d'eau) sera numériquement égal à P (en g par cm^2).

b) *Théorie de l'adsorption.*

L'origine du potentiel de l'eau au niveau d'un film liquide étalé sur une face plane peut encore s'expliquer si l'on admet que l'eau est soumise de la part du solide à une force d'attraction f, fonction de la distance x de la masse élémentaire de liquide à la paroi.

Si l'on admet avec PELTIER (1960) que la force f décroît avec la distance x selon une loi exponentielle

$$f = \mathrm{B}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{K}x} \ (\mathrm{B} \text{ et } \mathrm{K} = \text{ctes})$$

le travail nécessaire pour arracher l'eau au sol n'est autre que le travail accompli par une force égale et opposée à f lorsque son point d'application se déplace de $x = h$ (épaisseur du film) à l'infini

$$\psi_1 = \int_h^\infty f \mathrm{d}x$$

ou en remplaçant f par $B\,e^{-Kx}$ et en intégrant

$$\psi_1 = \frac{B}{K}\,e^{-Kh}. \tag{4}$$

Comme les formules (1) et (2) proposées par DERJAGUIN, cette dernière relation rend compte du fait que ψ diminue très rapidement au fur et à mesure qu'augmente l'épaisseur des films h.

2 — *Potentiel ψ_2 dû à la capillarité*

En des points tels que B (fig. 1) où la surface liquide est assez éloignée de la paroi solide pour que les phénomènes mentionnés ci-dessus (pression d'écartement ou forces d'adsorption) aient des effets négligeables, c'est alors un phénomène de capillarité classique (pression de LAPLACE P due à la courbure du ménisque) qui permet de rendre compte du potentiel de l'eau.

La pression P donnée par la formule

$$P = A\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

(où A désigne la tension superficielle de l'eau, r_1 et r_2 les deux rayons de courbure principaux du ménisque) est négative, puisque le ménisque est concave et le potentiel ψ_2 est alors

$$\psi_2 = -\,VP. \tag{5}$$

3 — *Effets combinés des films et des ménisques*

Si l'on imagine enfin des points tels que C (fig 1) où l'eau est étalée en films mais où de plus une certaine courbure est imposée par la géométrie du solide à la surface de séparation eau-air, les actions physiques mentionnées ci-dessus interviennent l'une et l'autre et le potentiel ψ est donné par la somme

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

Cette formule est en fait valable en tout point du liquide étant entendu que ψ_2 est négligeable en A et ψ_1 est négligeable en B.

A une humidité donnée du matériau, l'eau tend à se répartir à l'état de films et de manchettes de telle façon que le potentiel $\psi = \psi_1 + \psi_2$ soit le même en tout point.

III — LA RELATION POTENTIEL MATRICIEL — HUMIDITÉ ET LA TENSION SUPERFICIELLE DE L'EAU

Deux techniques de mesure ont été utilisées pour déterminer le potentiel : l'hygroscopicité dans la gamme des ψ élevés (supérieurs à $10^{4,5}$ g · cm/g) et l'extraction de l'eau sous pression pour les valeurs de ψ comprises entre 10^2 et 10^4 g · cm/g. Ces déterminations ont porté sur un même sol de limon humecté soit avec de l'eau distillée soit avec une solution (10 p. 100 en volume) de n-butanol, solution dont la

tension superficielle A n'est que de 33 (dynes par cm) environ au lieu de 73 pour l'eau pure.

En outre, quelques mesures d'hygroscopicité ont été répétées avec une solution de *n*-heptanol à 1 p. 1 000 et dont la tension superficielle A atteignait environ 40. On pouvait craindre en effet que le butanol qui est plus volatil que l'eau, ne s'évapore aussi plus vite lors de la mise en équilibre hygroscopique. Il importait donc de s'assurer que les résultats correspondant au butanol et à l'heptanol (alcool beaucoup moins volatil) conduisaient à la même courbe $\psi(H)$.

La figure 3 (p. 388) représente les deux courbes $\psi(H)$ relatives au limon témoin et au même matériau, humecté avec les solutions alcooliques indiquées.

On voit que dans l'ensemble, l'abaissement de la tension superficielle réduit le taux d'humidité H correspondant à une valeur donnée de ψ. Les points marqués traduisent pour la plupart des moyennes de quatre ou de huit mesures simultanées et les écarts,

$$\Delta H = H_{\text{témoin}} - H_{\text{alcool}}'$$

ont pu être testés par les méthodes statistiques ; ils sont tous significativement différents de zéro, même aux valeurs les plus élevées (de 10^6 et plus) où il n'atteignent que 0,1 à 0,3.

Toutefois à mesure que l'humidité croît, l'écart observé augmente non seulement en valeur absolue, mais également en valeur relative.

IV — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1 — *Influence de la tension superficielle sur le potentiel de l'eau au niveau des films et des manchettes. Estimation des quantités d'eau correspondant aux deux états*

A priori on devait s'attendre à ce que, pour une valeur donnée de ψ, un abaissement de la tension superficielle A, diminue la quantité d'eau retenue à l'état de manchette. En effet, ψ est égal à $\frac{2\,A}{r}$ (r étant le rayon du ménisque supposé sphérique). Dès lors, à une valeur donnée du potentiel correspondra un rayon de courbure r, d'autant plus faible que la tension superficielle A sera elle-même plus petite (voir fig. 2). Il doit s'ensuivre que A diminuant, la quantité d'eau retenue sous forme de manchettes et en fin de compte l'humidité H diminuent également.

Or, si l'on examine les courbes expérimentales (fig. 3) donnant ψ en fonction de H, l'effet indiqué est d'importance très inégale selon que l'on considère les valeurs élevées de ψ (supérieures à 10^5) ou les valeurs plus faibles du potentiel.

Aux valeurs élevées de ψ, un abaissement de la tension superficielle A par adjonction d'alcool entraîne une modification très faible sinon nulle de la courbe ψ (H). S'appuyant sur le raisonnement relaté ci-dessus, on en conclura tout d'abord que l'eau sous forme de manchette est elle-même en quantité négligeable ou, en d'autres termes, que l'humidité présente correspond presque uniquement à un enrobage

des particules solides par les films liquides. L'humidité H serait alors égale au produit de la surface spécifique du sol s (cm² par 100 g de sol) par l'épaisseur des films h (comptée en cm)

$$H = sh.$$

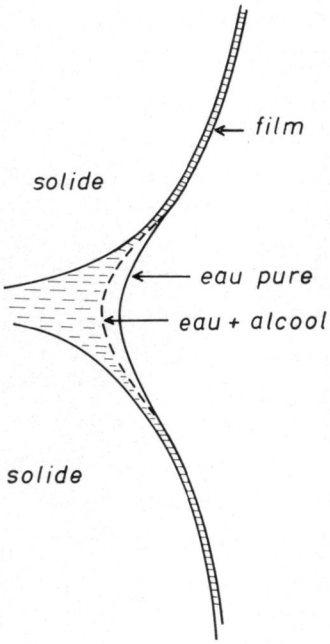


FIG. 2

Par ailleurs, le fait que la courbe expérimentale $\psi(H)$ ne soit guère modifiée par un abaissement de la tension superficielle A, permet de conclure que les formules qui relient ψ à l'épaisseur h des films, équations (2) et (3), ne font pas intervenir la tension superficielle A.

Enfin, dans cette gamme des valeurs élevées de ψ, on peut noter que la courbe donnant le logarithme de ψ en fonction de H, s'ajuste à une droite D (fig. 3) d'équation

$$\log \psi = 6{,}8 - bH \tag{6}$$

la pente b, variable d'un sol à l'autre, est d'autant plus petite que la surface spécifique du sol est plus grande ; cette relation est conforme à la formule (4)

$$\psi = \frac{B}{K} e^{-Kh}$$

qui conduit effectivement (si l'on remplace h par H/s et si l'on passe aux logarithmes) à

$$\log \psi = \log \frac{B}{K} - \frac{K \log e}{s} H. \tag{7}$$

Considérant maintenant la gamme des *potentiels plus faibles* ($\psi < 10^5$), on constate qu'en diminuant la tension A, on abaisse l'humidité correspondant à un ψ donné, la courbe ψ(H) se rapprochant alors de la droite D précitée ; l'abaissement d'humidité apparaît d'autant plus important que les valeurs considérées de ψ sont faibles.

On peut en conclure tout d'abord que la quantité d'eau constituée par les manchettes n'est plus négligeable et est d'autant plus importante que ψ est faible. Le résultat trouvé nous incite à admettre par ailleurs, ce qui ne saurait bien entendu traduire

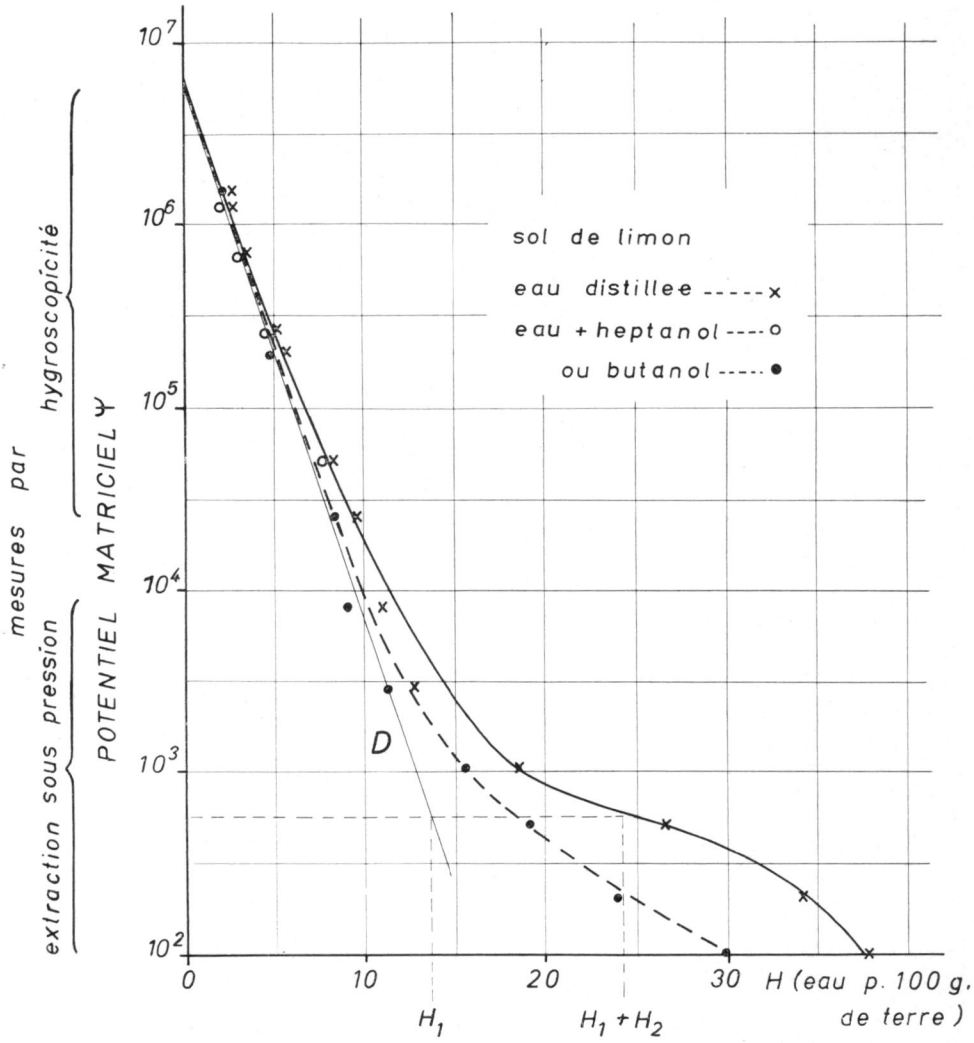


FIG. 3

la vérité que de façon approximative, que la droite D (fig. 3) correspondrait à la position limite de la courbe ψ(H) si l'on parvenait à réduire la tension superficielle A à zéro et à supprimer de ce fait les manchettes.

Dès lors, une humidité donnée H apparaît comme la somme de deux termes

$$H = H_1 + H_2 \tag{8}$$

où H_1, abscisse de la droite D pour la valeur considérée de ψ, représente le poids d'eau retenu par 100 g de sol, à l'état de film, et H_2, différence d'abscisses entre D et la courbe, représente le poids d'eau retenu à l'état de manchettes.

2 — *Épaisseur h, des films, correspondant à un potentiel donné*

L'approximation admise ci-dessus revient donc à admettre que la droite D extrapolée vers les faibles valeurs de potentiel exprime, pour toute la valeur de ψ, le pourcentage d'eau H_1, à l'état de film. C'est dire que la quantité H_1 ainsi définie est liée à l'épaisseur des films h par

$$H_1 = sh. \tag{9}$$

Dès lors en écrivant l'équation de la droite expérimentale D (équation 6) sous la forme plus générale

$$\log \psi = 6{,}8 - bH_1 \tag{6'}$$

on peut écrire quelle que soit la valeur de ψ

$$\log \psi = 6{,}8 - bsh$$

d'où l'on tire

$$h = \frac{6{,}8 - \log \psi}{bs}. \tag{10}$$

Ayant déterminé le terme b, pente de la droite expérimentale D, sur deux argiles dont les surfaces spécifiques très différentes avaient été déterminées par ailleurs [1] (Kaolinite et Montmorillonnite K) ; nous avons trouvé pour ces deux matériaux la même valeur du produit sb

$$sb = \frac{10^8}{135}.$$

Il s'ensuit que pour ces deux matériaux, la valeur de h correspondant à un ψ donné est la même, soit

$$h\,(\text{cm}) = (6{,}8 - \log \psi) \cdot 135 \cdot 10^{-8}$$

ou

$$h\,(\text{Å}) = (6{,}8 - \log \psi) \cdot 135$$

soit en particulier de 350 Å pour $\psi = 10^{4,2}$ (point de flétrissement permanent) et 540 Å pour $\psi = 10^{2,8}$ (capacité de rétention).

Le fait de trouver une même valeur du produit sb revient encore à attribuer au terme K figurant dans la formule (4)

$$\psi = \frac{B}{K} e^{-Kh} \tag{4'}$$

une même valeur. En effet, en rapprochant l'équation

$$\log \psi = \log \frac{B}{K} - (K \log e) \frac{H_1}{s}$$

[1] — Ces deux argiles nous ont été fournies par M. CHAUSSIDON de la Station centrale d'Agronomie de Versailles qui en avait déterminé les surfaces spécifiques. Nous l'en remercions sincèrement.

de celle de la droite expérimentale D (équation 6′), on obtient bien

$$\frac{1}{K} = \frac{\log e}{sb}$$

et en tenant compte de la valeur de sb indiquée plus haut,

$$\frac{1}{K} = 60 \text{ Å}$$

tandis que PELTIER avait trouvé des valeurs de l'ordre de 100 à 250 Å.

On se gardera cependant de conclure hâtivement que le coefficient K de l'exponentielle demeure le même quel que soit le sol.

La formule (3) de DERJAGUIN comporte elle aussi un terme de forme exponentielle qui permettrait de rendre compte, tout comme l'équation (4) découlant des travaux de PELTIER, des résultats expérimentaux obtenus. Mais pour DERJAGUIN, le coefficient de l'exponentielle serait en fonction de l'épaisseur de la couche ionique d.

CONCLUSIONS

Ainsi les modifications constatées de potentiel matriciel sous l'effet des variations de tension superficielle, confirment bien que l'abaissement d'énergie libre de l'eau est imputable à deux phénomènes physiques différents. L'un, concernant l'eau pelliculaire, apparaît indépendant de la tension superficielle A, tandis que l'autre se situe au niveau des ménisques et est étroitement lié à la tension A.

Toutefois, si l'expérience est conforme aux théories proposées, l'action complexe des cations échangeables n'a pas été envisagée. C'est en ce sens que nous entendons poursuivre ces recherches.

Reçu pour publication en février 1963.

SUMMARY

MATRIX POTENTIAL OF WATER IN POROUS MATERIALS AND SURFACE TENSION OF WATER

The study aimed at verifying the suitability of a new representation on which capillarity does not intervene alone and in which the effect of the solid phase on the water phase is taken into consideration. Experimental results show that the trend of the processes corresponds to the theoretical concepts proposed, and does not definitely justify the theories proposed, because they do not take exchangeable cations explicity into consideration ; the theories, however, actually represent a correct approach full of possibilities of introducing, in further studies, complementary factors so far not considered in any detail.

ZUSAMMENFASSUNG

MATRIX-POTENTIAL DES WASSERS IN PORÖSEM MATERIAL UND OBERFLACHENSPANNUNG DES WASSERS

Gegenstand dieses Berichts ist die Kontrolle der Übereinstimmung einer neuen Vorstellung, in der die Kapillarität nicht mehr allein wirkt, und in der man die Einwirkung fester Körper auf das hautförmige wasser in Betracht zieht. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Ablauf der

Ercheinungen den vorgeschlagenen theoretischen Vorstellungen entspricht, und dass die Oberflächenspannung die besondere Rolle spielt, die man ihr zumutet. Dies gestattet jedoch noch nicht, die vorgeschlagenen Theorien, die nicht ausdrücklich den austauschbaren Kationen Rechnung tragen, entgültig anzunehmen ; dieselben sind jedoch z Z. eine korrekte Annäherung, die die Möglichkeit eröffnen, in späteren Studien die Faktoren, die nicht einer Einzelbetrachtung unterzogen wurden, als Ergäzung einzuführen.

РЕЗЮМЕ

Матрический потенциал влаги в пористых материалах и поверхностное натяжение воды.

М. АЛЛЭР и К. БАЛЬДИ (Центральная Станция Биоклиматологии [Версаль]).

Об'ектом данной статьи является проверка соответствия с действительностью нового представления, в свете которого капилярность уже не действует одна, и при котором принимается также во внимание дйствие твердого вещества на пленочную влажность. Результаты экспериментов показывают что ход явления соответствует предложенным теоритическим описаниям, и что поверхностное натяжение действительно играет приписываемую ему особенную роль. Это не дает окончательного оправдания предлагаемым теориям которые не учитывают явно роли обменных катионов; но теории эти представляют в настоящее время корректную приблизительность, позволяющую при дальнейшем изучении ввести в качестве дополнения не разсмотренные еще детально явления.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSEN A. B. C., EDLEFSEN N. E., 1943. Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, **15**, 31-298.

BOLT G. H., FRISSEL M. S., 1960. Thermodynamics of soil moisture. *Netherl. J. Agr. sci.*, **8**, 57-58.

BABCOCK K. L. OVERSTREET R., 1957. The extrathermodynamics of soil moisture. *Soil Sci.*, **83**, 455-464.

TAYLOR S. A., EVANS D. D., KEMPER W. D. — Evaluating soil water. Bulletin 426. Agr. Exp. Station· *Utah State University*, Logan.

DERJAGUIN B. V., MELNIKOVA M. K., NERPIN S. V., 1956. — Theory of equilibrium and migration of soil moisture at various moisture contents. *Rapports VIe Congr. intern. Science Sol* 1re Commission, physique, du sol, Paris.

DERJAGUIN B. V., 1955. — Notion et évaluation de la pression d'écartement d'une couche liquide mince entre deux couches dures ; rôle dans la statique et la cinétique des couches liquides (en russe). *Journal des Colloïdes*, **17**, n° 3.

PELTIER R., 1960. — Esquisse d'une théorie moléculaire de l'adsorption et de la capillarité. *Cahiers de la Recherche théorique et expérimentale sur les matériaux et les structures*, n° 10. Eyrolles, Paris.

RICHARDS L. A., 1941. — A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Sci.*, **51**, 377-385.

TAYLOR S. A., 1958. — The activity of water in soils. *Soil Sci.*, **86**, 83-90.

TSCHAPEK M. W., 1959. — *El Agua el en suelo.* Collection del INTA, Buenos Aires.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 393-428.

LE POTENTIEL EFFICACE DE L'EAU DANS LE SOL EN RÉGIME DE DESSÈCHEMENT

M. HALLAIRE

avec la collaboration technique de Mme M. Yvon

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

En régime de dessèchement, le sol assure le transport de l'eau jusqu'à la surface d'évaporation ou jusqu'aux racines mais constitue par ailleurs la source même de la circulation liquide. Dès lors, au potentiel matriciel $\psi(H)$, fonction de l'humidité H, il convient d'ajouter un autre terme proportionnel à la vitesse de dessèchement dH/dt ; celui-ci exprime la chute de potentiel de l'eau à l'intérieur des mailles du sol qui jouent le rôle de sources.

La formule proposée permet de rendre compte des lois du dessèchement du sol trouvées expérimentalement et d'interpréter les réactions du végétal aux conditions de sécheresse.

Chapitre I.

GÉNÉRALITÉS SUR LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LE SOL SOUS L'EFFET D'UN GRADIENT DE POTENTIEL MATRICIEL

Tout fluide tend à se déplacer de façon que son potentiel diminue. C'est ainsi que l'eau tombe spontanément d'une hauteur z_1 à une hauteur moindre z_2. Le potentiel de l'eau décroît alors (par unité de masse) de $g\ (z_1 - z_2)$, et cette variation de potentiel correspond à la somme des énergies (mécaniques, calorifiques et autres) que l'eau peut céder dans sa chute.

De la même façon, l'eau se déplacera dans une conduite horizontale dans le sens des pressions décroissantes.

Si l'unité de masse de liquide occupe le volume V, le potentiel de l'eau qui passe de la pression P_1 à la pression moindre P_2, diminuera de la valeur $V\ (P_1 - P_2)$ et

cette dernière quantité représentera la somme des travaux fournis par la masse d'eau unitaire lors du changement de pression.

Pour les mêmes raisons, si le potentiel matriciel ψ de l'eau présente, d'un niveau à l'autre d'une même masse de sol, des valeurs différentes, l'eau aura ici encore tendance à se déplacer de façon à fournir de l'énergie ; la circulation se fera donc là aussi dans le sens des potentiels décroissants si nous entendons par potentiel, le travail que cède l'eau en passant de l'état considéré à un état de référence donné. Or, on a l'habitude (cf. article de M. HALLAIRE et C. BALDY dans le même numéro) de désigner par potentiel de l'eau, ψ, non pas le travail cédé par l'eau mais le travail qui doit être exercé sur l'eau lors de la transformation indiquée. ψ représente donc en réalité un potentiel changé de signe ; il s'ensuit que le déplacement de l'eau a lieu naturellement dans le sens des ψ croissants. L'eau circule donc des zones où H est élevée vers celles où H est faible. La circulation tend ainsi à égaliser les humidités tout comme la diffusion de la chaleur tend à égaliser les températures.

I. — ÉQUATIONS DE DIFFUSION

Se limitant à un mouvement unidimensionnel, on considérera le débit selon une direction $z'z$ provoqué par un gradient de potentiel total $d\Phi/dZ$.

Le débit q à un niveau z représente le volume d'eau qui traverse le plan considéré (plan perpendiculaire à $z'z$ au niveau z) par unité de surface et de temps ; il a donc les dimensions d'une vitesse ; on peut l'évaluer en centimètres par seconde, mais il est plus commode (pour le comparer notamment aux évaporations) de l'évaluer en millimètres par jour ; il correspond alors au volume d'eau (en dixièmes de cm^3) qui traverse 1 cm^2 par jour.

L'équation générale de diffusion

$$q = \lambda \frac{d\Phi}{dz} \tag{1.1}$$

exprime que le débit est proportionnel au gradient du potentiel total, le terme λ représentant le coefficient de conductibilité pour l'eau du matériau considéré.

Si $z'z$ correspond à la direction verticale, le potentiel total Φ est la somme du potentiel matriciel $\psi(H)$ et du potentiel newtonien (si l'on suppose la température et la pression osmotique de l'eau uniformes). Or, le potentiel newtonien évalué en g · cm par g d'eau est numériquement égal à z (cm), d'où

$$q = \lambda \frac{d(\psi + z)}{dz}$$

soit

$$q = \lambda \frac{d\psi}{dz} + \lambda.$$

S'il s'agit d'un mouvement horizontal ou si l'action de la pesanteur est négligeable, cette formule s'écrit simplement :

$$q = \lambda \frac{d\psi}{dz}. \tag{1.1'}$$

On sait que le coefficient de conductibilité λ diminue au fur et à mesure que l'humidité H décroît. En effet, les films liquides ou les canalicules pleins d'eau qui assurent le transport sont de moins en moins nombreux et de plus en plus fins. C'est ce que CHILDS et COLIS GEORGE (1950), en particulier, ont clairement montré en calculant de proche en proche les valeurs successives de λ pour des valeurs de ψ de plus en plus faibles. D'une valeur de ψ à la suivante, $\psi - \Delta\psi$, la probabilité pour que deux canaux pleins d'eau débouchent l'un dans l'autre, se trouve augmentée puisque la diminution $\Delta\psi$ du potentiel matriciel fait intervenir d'autres canalicules. D'autre part, il s'agit de canalicules plus gros, donc meilleurs conducteurs. Il s'ensuit une variation très rapide de λ en fonction de ψ.

DERJAGUIN (1956), en considérant l'écoulement laminaire de l'eau le long des films, aboutit par le calcul à la relation

$$\lambda = \frac{\alpha s h^3}{2\,\eta}$$

s désignant la surface spécifique du sol, h l'épaisseur des films, η la viscosité de l'eau et α un coefficient numérique. La relation simplifiée qu'il donne par ailleurs entre h et le potentiel matriciel ψ ($\psi \# \mathrm{A}h^{-3}$) conduit à

$$\lambda \# \frac{\alpha \mathrm{A} s}{2\eta\psi}. \qquad (1.2)$$

Cette relation, de forme hyperbolique, accuse elle aussi la variation extrêmement rapide que le coefficient λ doit présenter en fonction du potentiel.

Étant donné que le potentiel matriciel ψ est fonction de l'humidité H, on peut exprimer le débit en fonction du gradient d'humidité dH/dZ.

L'équation (1.1') écrite ci-dessus peut en effet se mettre sous la forme

$$q = \lambda \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{dH}} \cdot \frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}z}$$

soit

$$q = \mathrm{D}\frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}z} \qquad \text{avec} \qquad \mathrm{D} = \lambda \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{dH}}. \qquad (1.3)$$

D est le coefficient de diffusivité. Il correspond au produit du coefficient de conductibilité λ qui, comme il vient d'être rappelé, croît rapidement avec l'humidité, par la pente de la courbe donnant ψ en fonction de H, pente qui au contraire diminue quand H augmente. Il s'ensuit une variation atténuée de D avec l'humidité. Certains ont cru pouvoir assimiler D à une constante (CHILDS, 1936 et HALLAIRE, 1953). On verra plus loin que tel n'est pas le cas. D variant en fait avec l'humidité selon une loi exponentielle.

Si le débit q varie avec la profondeur, on aura affaire au régime non permanent ou variable.

Considérons une tranche de terre z, $z + dz$. Les débits (comptés ici positivement dans le sens des z décroissants) seront

— au niveau z : q ;

— au niveau $z + \mathrm{d}z$: $q + \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)\mathrm{d}z$;

L'accroissement de débit $\left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)\mathrm{d}z$ représente, selon qu'il est positif ou négatif,

un gain ou une perte pour la tranche. Or, il peut être relié à la variation de l'humidité H. En effet, si σ désigne la densité apparente du sol,

— la quantité d'eau contenue par la tranche est (en mm) : $\frac{\sigma}{10} H dz$;

— la quantité d'eau gagnée (en mm par jour) est : $\frac{\sigma}{10} \frac{\partial H}{\partial t} dz$.

On peut ainsi écrire

$$\frac{\partial q}{\partial z} dz = \frac{\sigma}{10} \frac{\partial H}{\partial t} dz \tag{1.4}$$

soit

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\sigma}{10} \frac{\partial H}{\partial t}. \tag{1.5}$$

C'est là l'équation fondamentale de continuité qui exprime tout simplement la conservation de la matière et qui demeure valable quelle que soit la formule de diffusion admise.

Si l'on tient compte maintenant de l'équation de diffusion (1.3) l'équation de continuité prendra la forme

$$\frac{\sigma}{10} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D \frac{\partial H}{\partial t}\right). \tag{1.6}$$

II. — Vérifications expérimentales

Des techniques variées ont permis de mesurer soit le coefficient de conductibilité λ soit le coefficient de diffusivité D d'un sol donné aux différentes valeurs d'humidité.

Citons à titre d'exemple la méthode utilisée par Moore (1939) qui réalisait un régime permanent entre une zone saturée à une certaine profondeur dans une colonne de sol et la surface d'évaporation. Le débit est donné par l'évaporation (maintenue constante) tandis que les potentiels aux différents niveaux, ainsi par conséquent que les gradients $d\psi/dz$, peuvent être obtenus à partir de mesures tensiométriques. Se référant à l'équation (1.1'), on dispose de toutes les données nécessaires à la détermination de λ.

Une autre méthode (Christensen, 1944 ; Nielsen, 1960 ; Richards, 1953), consiste à imposer aux deux extrémités d'une colonne de sol de longueur L, des potentiels donnés ψ_1 et ψ_2 par un dispositif approprié (succion, pression extérieure,...).

D'une expérience à l'autre, on peut faire varier, et le gradient de potentiel $\frac{\psi_1 - \psi_2}{L}$ et le potentiel moyen $\frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$. Il est donc possible, si l'on mesure dans chaque cas le débit q, de déterminer le coefficient λ en fonction de ψ.

Ces méthodes ont conduit à des représentations graphiques de λ en fonction de ψ qui confirment bien la décroissance très rapide de λ au fur et à mesure que ψ augmente.

Par une voie totalement différente, puisqu'il partait non plus d'expériences de laboratoire, mais de la considération des profils hydriques déterminés en plein

champ, l'auteur du présent article (HALLAIRE, 1953), avançait l'hypothèse que la variation de λ en fonction de ψ devrait être traduite par la formule

$$\lambda = \frac{A}{\psi - 1\,000} \quad (A = \text{cte}) \tag{1.7}$$

formule qui ne serait, bien entendu, valable que dans la gamme des ψ supérieurs à 1 000, c'est-à-dire des humidités inférieures à la capacité de rétention.

Cette hypothèse permettait de rendre compte de la forme moyenne des profils hydriques observés au champ en période de desséchement. Ceux-ci correspondent à une variation quasi-linéaire de Log (ψ — 1 000). Or, si l'on porte la valeur de λ donnée par (1.7) dans la formule (1.1'), on obtient

$$q = \left(\frac{A}{\psi - 1\,000}\right)\frac{d\psi}{dz}$$

soit

$$q = A\,\frac{d\,\mathrm{Log}\,(\psi - 1\,000)}{dz} \tag{1.8}$$

équation selon laquelle les profils hydriques observés correspondraient aux conditions du régime permanent.

L'hypothèse avancée sur la forme de variation de λ (équation 1.7), qui permettait tout d'abord d'interpréter la forme des profils, est en assez bon accord avec la formule théorique proposée par DERJAGUIN (équation 1.3) ; elle traduit enfin une variation de λ en fonction de ψ assez voisine de celle à laquelle on parvient en effectuant les calculs imaginés par CHILDS et COLIS GEORGE et rappelés plus haut.

La formule (1.7) permet d'autre part, en tenant compte de la courbe ψ (H) de préciser comment le coefficient de diffusivité D varie avec l'humidité : la variation apparaît si faible, tout au moins dans la gamme d'humidité utile, qu'on peut pratiquement assimiler D à une constante.

Plus récemment, GARDNER (1956-1958) a imaginé une méthode nouvelle pour déterminer les coefficients de conductibilité ou de diffusivité D. Utilisant l'appareil à plaque poreuse pour l'extraction de l'eau sous pression, il fait monter successivement la pression de P_1 à P_2, de P_2 à P_3, de P_3 à P_4,... ; il mesure chaque fois la quantité d'eau extraite et la vitesse d'extraction de l'eau et en déduit pour chaque gamme de pression $P_1 - P_2$, $P_2 - P_3$,., c'est-à-dire pour chaque gamme de potentiel matriciel correspondante, les valeurs de λ et de D.

Il aboutit à des courbes représentant λ en fonction du potentiel (ou de la pression de succion équivalente) et D en fonction de l'humidité H, telles que celles indiquées sur les figures (1) et (2). Selon GARDNER, ces relations expérimentales peuvent être traduites par des expressions de la forme

$$\lambda = \frac{a}{\psi^n + b} \tag{1.9}$$

$$D = D_0 \exp \beta\,(H - H_0) \tag{1.10}$$

a, *b* et β étant des constantes pour un sol donné, *n* un coefficient variant de 1 à 4 selon la texture du sol, D_0 la valeur de D pour $H = H_0$.

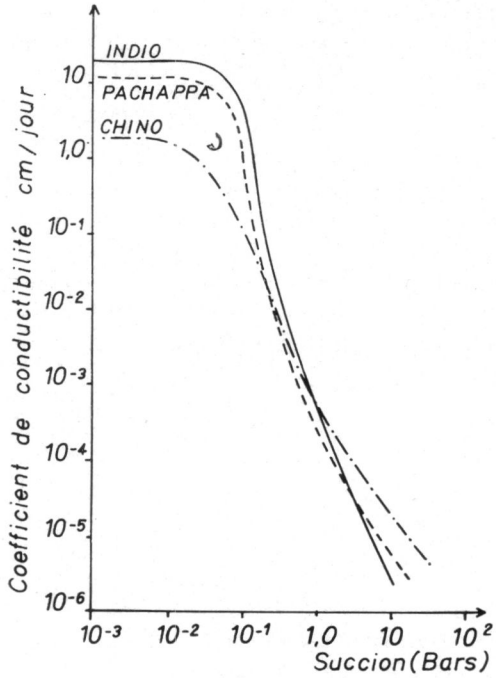


FIG. 1. — *Variation du coefficient de conductibilité λ en fonction de la succion pour trois sols* (d'après GARDNER)

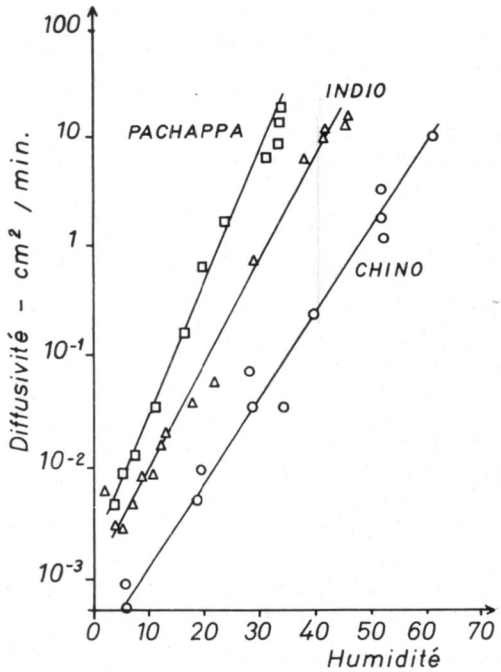


FIG. 2. — *Variation du coefficient de diffusivité D en fonction de l'humidité H pour trois sols* (d'après GARDNER)

Le rapport a/b n'est autre que la valeur du coefficient de conductibilité (voir équation 1.9) quand le sol est saturé ($\psi = 0$) ; il est donc égal au coefficient de perméabilité figurant dans la loi de DARCY.

L'équation (1.10) montre que si la variation de D avec l'humidité est plus atténuée que celle de λ (du fait que D correspond au produit de deux fonctions de H, l'une croissante, l'autre décroissante), le coefficient de diffusivité est loin de demeurer constant comme certains l'avaient pensé.

Les recherches de KLUTE (1956), de STAPLE et LEHANE (1954) conduisent à des résultats semblables.

En résumé, l'ensemble des travaux cités confirment les lois théoriques relatives à la circulation de l'eau dans le sol ; les seules différences concernent les formules d'ajustement qui traduisent au mieux la variation du coefficient de conductibilité λ en fonction du potentiel et surtout celle du coefficient de diffusivité D avec l'humidité. Il ne s'agit cependant là que de divergences mineures. Beaucoup plus graves sont les contradictions fondamentales que nous avons décelées entre les lois de diffusion classiques et la circulation de l'eau dans un sol soumis à un desséchement assez rapide, au voisinage par exemple d'une surface évaporante.

Le but de ce mémoire est de décrire les lois auxquelles obéissent alors les déplacements de l'eau et après en avoir souligné l'aspect paradoxal, de les expliquer en montrant qu'au cours du desséchement, l'eau est soumise à un potentiel efficace fonction, d'une part, de l'humidité et d'autre part, de la vitesse de desséchement du sol dH/dt.

CHAPITRE II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS EN VOIE DE DESSÈCHEMENT. NON-VALIDITÉ DE L'ÉQUATION DE DIFFUSION

Pour vérifier expérimentalement les lois théoriques de la diffusion de l'eau, on a eu généralement tendance à se placer dans les conditions du régime permanent, à assurer autrement dit un débit identique aux différents niveaux d'une colonne de sol. Dans ces conditions, la terre conserve en chaque point la même humidité ($dH/dt = 0$), le sol ne servant alors qu'à « véhiculer » l'eau.

Dans les recherches expérimentales que nous avons entreprises et qui sont décrites ci-après, nous nous sommes placé délibérément dans le cas contraire : le débit à tout niveau est assuré par le desséchement même du sol dans l'ensemble des horizons sous-jacents. La terre joue alors deux rôles : elle assure le transport liquide et elle est la source même du débit observé.

I. — Technique expérimentale et mesures

Des tubes de 6 cm de diamètre et de 30 cm de long sont remplis d'une terre présentant une humidité initiale donnée. Nous avons généralement opéré sur un certain sol de limon mais les résultats obtenus ont pu être vérifiés sur d'autres types de sol ainsi que sur vermiculite et alumine. Le remplissage peut être effectué à partir d'une terre émiettée et homogénéisée ayant alors une certaine humidité H_0 sur toute la hauteur de la colonne et que l'on tasse dans le tube de façon à obtenir une densité apparente donnée (σ) du sol. On peut encore enfoncer de force les tubes dans le sol en place et prélever ainsi des carottes de terre qui présenteront alors des humidités initiales H_0 plus ou moins variables avec la profondeur z mais que l'on peut déterminer facilement.

Ainsi remplis, les tubes sont fermés par un couvercle à leur base, tandis que la tranche supérieure de sol peut évaporer librement. Pour que les conditions d'évaporation demeurent sensiblement constantes dans le temps, les colonnes de sol sont placées dans des chambres à température et degré hygrométrique constants, soit en atmosphère calme et à température peu élevée si l'on veut une évaporation faible, soit au contraire, sous lampe électrique ou près d'un ventilateur si E doit être élevé.

Pour connaître l'évaporation E à laquelle la terre est effectivement soumise pendant un laps de temps donné Δt, il suffit de déterminer la variation de poids des tubes

$$E = \frac{\Delta P}{S\Delta t}. \qquad (II.1)$$

Cette évaporation sera donnée en mm/jour si ΔP est évalué en dg, la surface de la colonne S en cm² et Δt en jours.

Cette évaporation E n'est autre que le débit q_0 à la surface même du sol, c'est-à-dire à la profondeur $z = 0$

$$q_0 = E. \qquad (II.2)$$

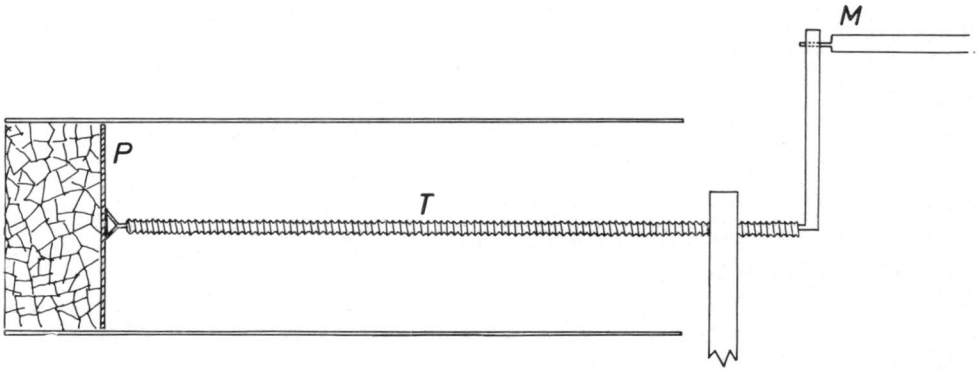


Fig. 3. — *Schéma de l'appareil permettant d'extraire le sol du tube en vue de la détermination des profils hydriques*

Après un certain temps d'évaporation, la détermination des humidités H du sol aux différentes profondeurs est effectuée par dessèchement d'échantillons à l'étuve et requiert ainsi la destruction de la colonne de terre.

Le prélèvement des échantillons est réalisé de deux façons : on commence à vider le tube par le fond en enlevant successivement les tranches de terre de 25-30, de 20-25 et de 15-20 cm. Puis le tube est placé sur un appareil spécial représenté fig. 3, qui permet d'extraire progressivement du tube le reste de la colonne de sol au moyen du piston (P) fixé sur une tige filetée (T), elle-même munie d'une manivelle (M). On peut alors extraire du tube des tranches de sol de quelques millimètres seulement. Cette méthode permet en outre de connaître très exactement les profondeurs z auxquelles correspondent les humidités H déterminées ensuite par desséchement à l'étuve.

Pour connaître les profils hydriques à des moments différents t_1, t_2,... on est obligé de partir d'une série de colonnes de terre identiques, de les soumettre aux mêmes conditions et de les sacrifier successivement.

Ayant déterminé l'abaissement d'humidité ΔH correspondant à l'intervalle de temps Δt (jours) et à une tranche d'épaisseur Δz (centimètres), on en déduit immédiatement la quantité d'eau ΔU perdue dans l'unité de temps par la tranche. En effet, sachant qu'à l'humidité H, la tranche $z, z + \Delta z$ contient une hauteur d'eau équivalente donnée par

$$\Delta Q = \frac{\sigma}{10} H \, \Delta z \qquad \text{(mm)}.$$

La perte en eau ΔU sera

$$\Delta U = \frac{-\sigma}{10} \frac{\Delta H}{\Delta t} \Delta z \qquad (\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}).$$

Il est intéressant par ailleurs de considérer à chaque profondeur la quantité d'eau u perdue par jour et par tranche d'un centimètre d'épaisseur. Elle est donnée par le quotient $\Delta U / \Delta z$, c'est-à-dire

$$u = \frac{-\sigma}{10} \frac{\Delta H}{\Delta t} \qquad (\text{mm} \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}) \tag{II.3}$$

Ces évaluations de ΔU et de u permettent de déterminer le débit q aux différents niveaux :

A chaque profondeur z, le débit *per ascensum* est égal à la somme des pertes en eau comptées au-dessous de z, ce qui revient à écrire

$$q = \sum_{z}^{\infty} \Delta U \tag{II.4}$$

ou si l'on veut encore

$$q = \int_{\infty}^{z} u \, dz \tag{II.5}$$

On notera ici que cette équation donne après dérivation

$$\frac{dq}{dz} = -u \tag{II.6}$$

soit en remplaçant u par l'expression donnée en (II.3)

$$\frac{dq}{dz} = \frac{\sigma}{10} \frac{dH}{dt} \tag{II.7}$$

ce qui n'est autre que l'équation fondamentale de continuité (1.5).

Pratiquement, on serait conduit, pour les faibles profondeurs, à une évaluation

du débit q très imprécise, si l'on calculait celui-ci à partir des variations d'humidités comptées dans toutes les couches sous-jacentes. Par contre, le débit en surface q_0 est connu avec une bonne précision puisque, égal à l'évaporation, il est directement donné par la variation de poids de la colonne (formule II.1 et II.2). On obtiendra ainsi le débit q, dans les premiers centimètres, avec une précision bien meilleure en soustrayant de q_0, les pertes en eau du sol comptées de la surface jusqu'à la profondeur z envisagée

$$q = E - \sum_{o}^{z} \Delta U. \qquad (II.8)$$

Le gradient d'humidité dH/dz qu'il convient de considérer dans les études sur la diffusion se déduit d'emblée des humidités H déterminées aux différents niveaux.

Le mode de calcul de ces différentes quantités est explicité sur un exemple dans le tableau ci-après :

z (cm)	Δz (cm)	H_0 (t = o)	H (t = 1j)	$\frac{\Delta H}{\Delta t}$	u (1) $mm \cdot j^{-1} \cdot cm^{-1}$	ΔU $mm \cdot j^{-1}$	q $mm \cdot j^{-1}$	$\frac{dH}{dz}$
0							6,05 (2)	
	0,5	21,5	8,8	12,7	1,78	0,89		
0,5							5,16	6,4
	0,5	21,5	12,0	9,5	1,33	0,66		
1							4,50	5,2
	0,5	21,5	14,6	6,9	0,97	0,48		
1,5							4,02	2,8
	0,5	21,5	16,0	5,5	0,77	0,38		
2							3,64	1,2
	1	21,5	16,9	4,6	0,64	0,64		
3							3,00	0,5
	1	21,5	17,4	4,1	0,57	0,57		
4							2,43	0,6
	1	21,5	18,0	3,5	0,49	0,49		
5							1,92	
	etc.	etc.						

(1) La densité apparente du sol étant 1,40, on a $u = 0,14\ \Delta H/\Delta t$.
(2) 6,05 = évaporation mesurée directement par pesée.

Ces techniques de mesure des différentes grandeurs relatives au phénomène de la circulation de l'eau dans le sol ont conduit à un certain nombre de lois expérimentales simples. Nous allons les examiner successivement en montrant d'une part, qu'elles découlent l'une de l'autre et d'autre part, qu'elles sont en contradiction avec les lois classiques de la diffusion.

II. — Variation de la vitesse de dessèchement du sol en fonction de la profondeur

L'évaporation en surface est égale à tout instant à la somme des pertes en eau de toutes les tranches de sol. Une des premières questions qui vient à l'esprit est donc la suivante : comment se répartissent en profondeur ces pertes en eau corres-

pondant à E? C'est ce qui conduit à représenter graphiquement les pertes u (en millimètres par jour et par centimètre) en fonction de z (fig. 4).

D'une façon très générale, la courbe que l'on obtient en joignant les points, traduit toujours une décroissance régulière et continue de u avec z ce qui signifie que le desséchement provoqué par l'évaporation superficielle est de moins en moins prononcé à mesure que l'on s'éloigne de la surface. La courbe présente de plus une allure d'exponentielle, la décroissance de u étant d'autant plus grande que u est lui-même élevé. On observe cependant, à une profondeur z_1 de quelques centimètres, une certaine discontinuité dans la pente du/dz.

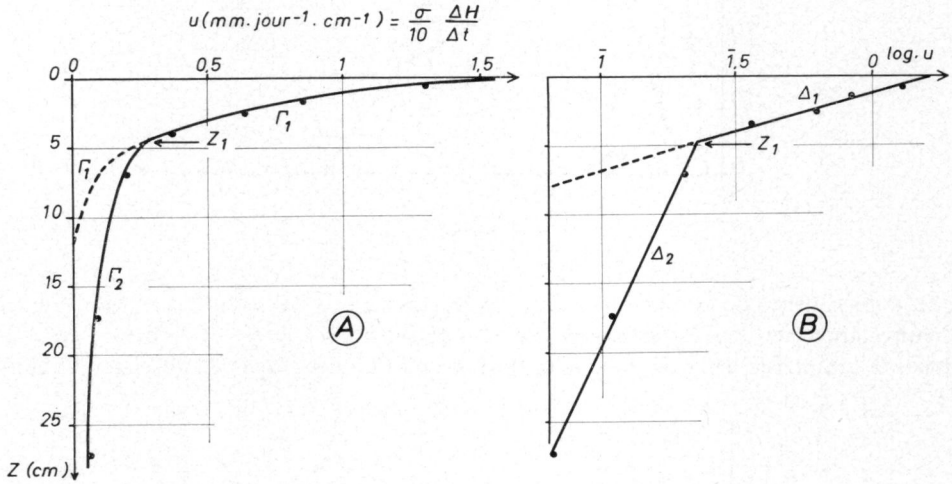


FIG. 4. — *Variation de la vitesse de desséchement du sol* u *en fonction de la profondeur.*

La loi de variation exponentielle et la rupture de pente sont mieux mises en évidence si l'on représente la variation de log u en fonction de z. On obtient généralement (fig. 4 B) deux droites Δ_1 et Δ_2 d'équations

$$\log u = \log u_o - b_1 z \qquad \text{et} \qquad \log u = \log u'_o - b_2 z \tag{II.9}$$

Ceci confirme bien que u varie avec la profondeur selon deux lois exponentielles

$$u = u_o \exp(-a_1 z) \qquad (\text{courbe } \Gamma_1 \text{ fig 4 A}) \tag{II.10}$$

et

$$u = u'_o \exp(-a_2 z) \qquad (\text{courbe } \Gamma_2 \text{ fig 4 A}) \tag{II.10'}$$

les coefficients a étant liés aux coefficients angulaires des droites Δ par

$$b = a \log e \qquad (e = \text{base des logarithmes népériens}). \tag{II.11}$$

Ce résultat appelle quelques précisions. Tout d'abord les deux coefficients « a » figurant dans les lois exponentielles, tout en présentant bien entendu une certaine fluctuation d'une expérience à l'autre, présentent tous deux une valeur moyenne caractéristique du matériau étudié.

Les courbes de fréquence représentées fig. 5 font apparaître la valeur moyenne et la dispersion de a_1 et de a_2 relatives au limon de Versailles.

Une autre remarque doit retenir spécialement l'attention : Au fur et à mesure

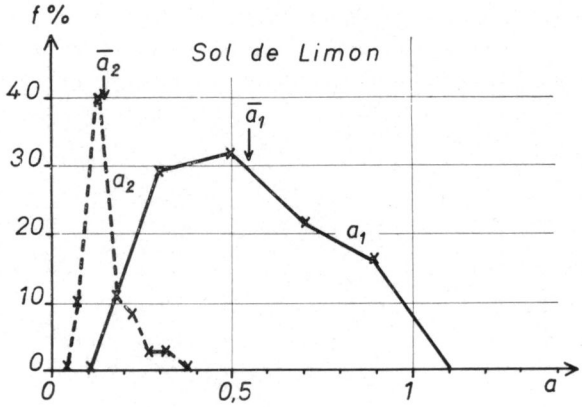


FIG. 5

que le sol se dessèche, on ne constate guère de variation systématique du coefficient a_1. Celui-ci apparaît donc indépendant de l'humidité du sol. C'est ce que met en évidence le graphique de la fig. 6 où sont portés, en ordonnées, a_1 et en abscisses, l'humi-

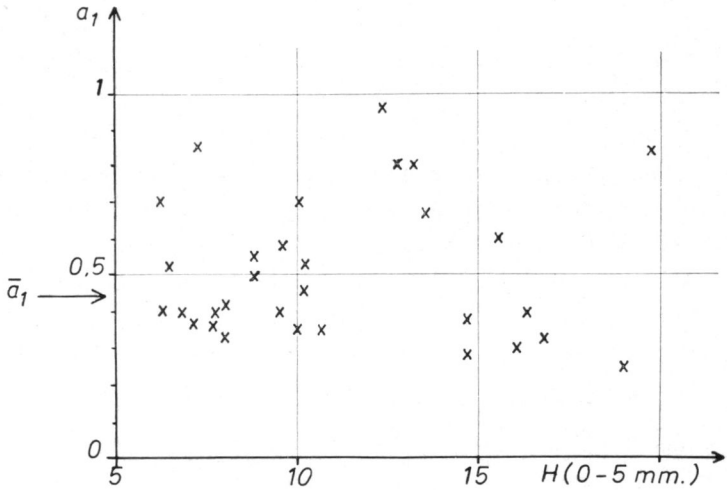


FIG. 6

dité H à laquelle est parvenue la première tranche de 5 mm d'épaisseur. On constate bien qu'il n'existe aucune corrélation entre a et H.

Enfin, l'expérience montre que le passage de l'exponentielle Γ_1 caractérisée par le coefficient a_1 à l'exponentielle Γ_2 caractérisée par a_2 a lieu à une profondeur z_1 correspondant à une valeur particulière de la vitesse de dessèchement du sol u. Dési-

gnons par u_c cette valeur critique qui, pour le limon de Versailles, est de l'ordre de 0,4. En fait, les valeurs trouvées de u_c présentent une certaine fluctuation autour de cette valeur moyenne comme le montre la courbe de fréquence de la fig. 7.

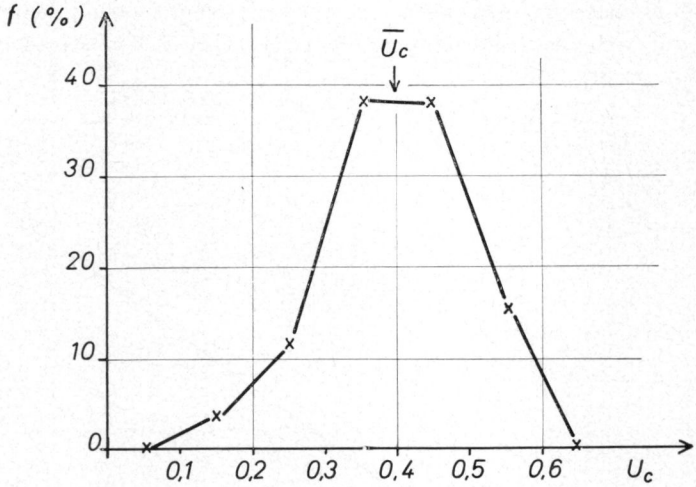


FIG. 7

III. — VARIATION DU DÉBIT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

A tout niveau, le débit q est la somme des pertes en eau du sol au-dessous de la profondeur envisagée. Si la profondeur de sol est infinie, q est donné par

$$q = \int_{\infty}^{z} u \mathrm{d}z. \qquad \text{(II.12)}$$

Considérons tout d'abord les profondeurs supérieures à z_1 où l'on n'a affaire qu'à la deuxième exponentielle Γ_2. Si l'on porte dans l'équation précédente la valeur de u donnée par (II.10') on obtient après intégration.

$$q = \frac{u'_o}{a_2} \exp(-a_2 z). \qquad \text{(II.13)}$$

Le débit varie donc lui aussi selon une loi exponentielle.

Entre les profondeurs 0 et z_1, le débit q peut être considéré comme la somme de deux termes :

— d'une part les pertes en eau du sol telles qu'elles seraient définies au-dessous de z par la courbe Γ_1 extrapolée en profondeur ;

— D'autre part, les pertes en eau correspondant à la surface comprise entre les courbes Γ_1 et Γ_2, pertes qui seront désignées par la lettre B.

Au total, on aura dans la tranche 0-z_1

$$q = \mathrm{B} + \frac{u_o}{a_1} \exp(-a_1 z). \qquad \text{(II.14)}$$

La variation du débit en profondeur répond donc aussi à deux lois exponentielles définies par les équations (II.13 et II.14).

IV. — Expression du débit en fonction de la vitesse de desséchement

On se placera d'abord dans le cas où la profondeur de sol est infinie.

Considérons successivement les profondeurs supérieures et inférieures à z_1.

Pour z supérieur à z_1, les deux équation (II.10′ et II.13), exprimant respectivement u et q, en fonction de z

$$u = u'_0 \exp(-a_2 z) \qquad \text{et} \qquad q = \frac{u'_0}{a_2} \exp(-a_2 z)$$

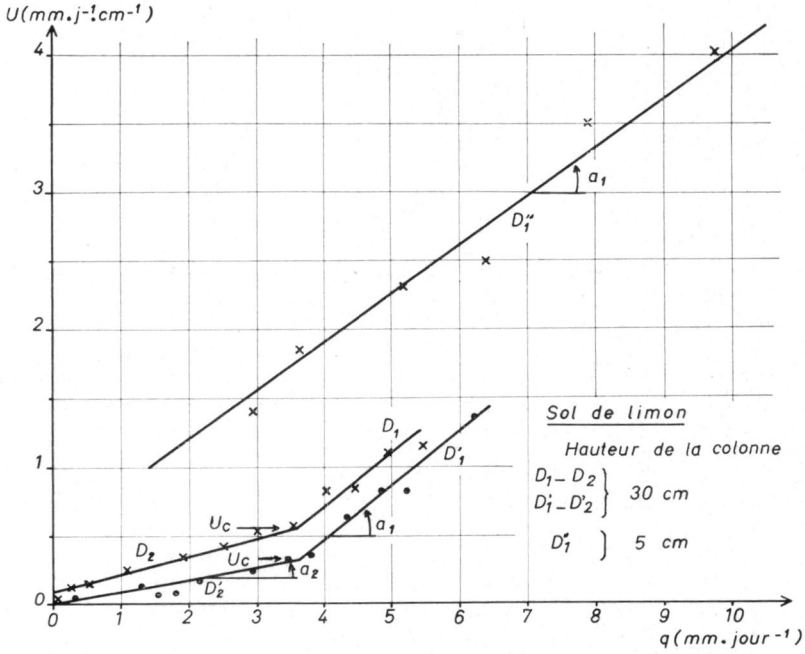


Fig. 8. — *Relation entre la vitesse de desséchement u et le débit q*

donnent après élimination de z

$$u = a_2 q \tag{II.15}$$

équation selon laquelle la vitesse de desséchement est proportionnelle au débit, le coefficient de proportionnalité n'étant autre que le coefficient a_2 figurant dans la loi exponentielle.

Pour z compris entre 0 et z_1, les deux équations (II.10 et II.14)

$$u = u_0 \exp(-a_1 z) \qquad \text{et} \qquad q = \mathrm{B} + \frac{u_0}{a_1} \exp(-a_1 z)$$

donnent après élimination de z

$$u = a_1(q - \mathrm{B}). \tag{II.16}$$

Ici encore, le résultat trouvé se prête à une vérification directe. Si, sur un graphique (u, q) on porte les points correspondant aux différentes profondeurs z mais relevant d'une seule expérience de desséchement réalisée sur des colonnes de terre

assez hautes (minimum 30 cm), on est bien conduit (fig. 8, droite D_1 et D_2) au tracé de deux droites répondant aux deux équations (II.15 et II.16) données par le calcul.

Si sur le même graphique (u, q) on porte les séries de points correspondant à d'autres expériences répétées sur un même sol, on est conduit à des ajustements quelque peu différents (droites D'_1 et D_2, fig. 8).

La représentation de u en fonction de q permet de trouver les coefficients a_1 et a_2 des exponentielles : ce sont les coefficients augulaires des deux droites d'ajustement $u(q)$. Elle permet en outre de repérer la valeur critique u_c correspondant au passage de l'exponentielle Γ_1 à l'exponentielle Γ_2 (fig. 4) ; c'est la valeur de u correspondant à l'intersection des deux droites d'ajustement D_1 et D_2 (fig. 8).

Les ajustements différents auxquels on est conduit d'une expérience à l'autre sont dus aux fluctuations de a_1, a_2 et u_c.

Cette représentation met en évidence le fait que pour un matériau donné, on peut associer à la valeur critique u_c de la vitesse de desséchement une valeur critique q_c du débit définie par

$$q_c = u_c/a_2 \qquad \text{(II.17)}$$

soit pour le limon étudié 0,4/0,15 # 2,5 mm/jour. Dès lors, si l'évaporation, ou débit en surface, est inférieure à cette valeur particulière de 2,5 mm/jour, la valeur de u en surface est elle-même inférieure à la valeur critique de u_c et la variation de u en profondeur est donnée par une seule courbe exponentielle du type de Γ_2.

Les relations précédentes s'appliquent au cas où la profondeur de sol est théoriquement infinie. Si au contraire la profondeur est limitée à une valeur h, le débit q est donné maintenant par la somme

$$q = \int_z^h u \mathrm{d}z \qquad \text{(II.18)}$$

et la relation entre le débit q et la vitesse de desséchement u tout en demeurant linéaire est quelque peu différente. En effet, à la profondeur h, q est nul, tandis que u ne l'est pas. La droite de régression ne passe donc plus par l'origine, et le même débit q entraîne un desséchement u plus important (droite D''_1, fig. 8).

V. — Expression du débit en fonction du gradient d'humidité

L'expression à laquelle on va être conduit en partant des résultats déjà mentionnés offre cet intérêt qu'elle pourra être confrontée à l'équation théorique (1.3) relatée au premier chapitre

$$q = \mathrm{D}\frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}z}$$

dans laquelle D, coefficient de diffusivité, serait comme on l'a vu à la lumière des travaux les plus récents, fonction croissante du taux d'humidité H (cf. formule 1.10).

Ce dernier résultat laisserait penser que les séries de valeurs de q et de $\mathrm{dH}/\mathrm{d}z$ obtenues à un moment donné aux profondeurs successives d'une colonne de sol, doivent conduire à une courbe telle que celle indiquée fig. 9, courbe tournant sa concavité vers le bas. En effet, chaque point M de la courbe correspond à une certaine profondeur qui, au moment considéré, présente une certaine humidité H. Le coef-

ficient angulaire de la droite OM, quotient de q par dH/dz, n'est autre que le coefficient de diffusivité D correspondant à l'humidité en question H.

Or, la suite des points M_0, M_1, M_2... relatifs à des profondeurs de plus en plus grandes z_0, z_1, z_2... correspond d'une part à des débits q de plus en plus faibles (q portés en ordonnées), d'autre part à des humidités H_0, H_1, H_2... de plus en plus

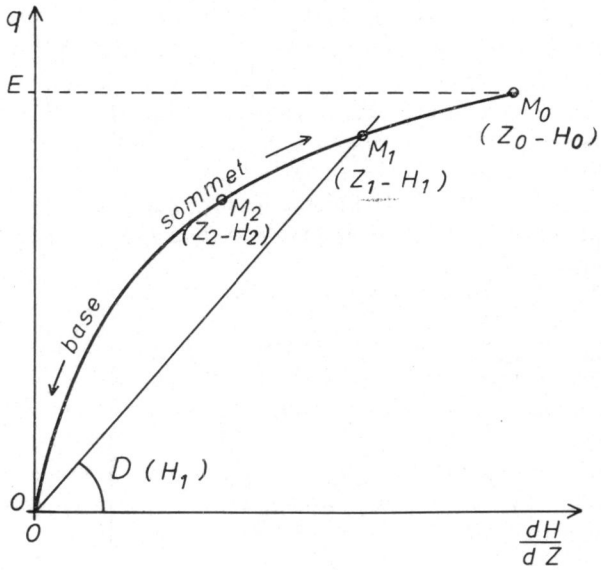


FIG. 9. — *Relation (supposée) entre le débit q et le gradient d'humidité dH/DZ*

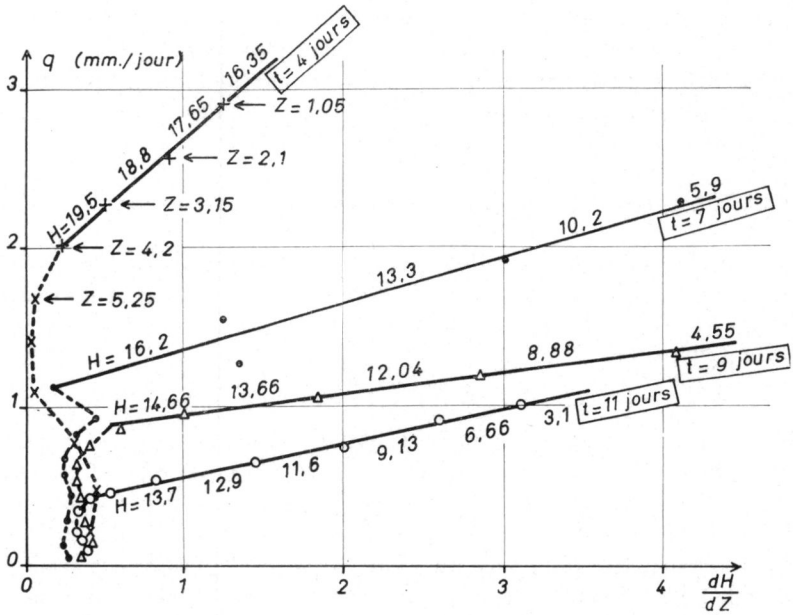


FIG. 10. — *Relation (expérimentale) entre le débit q et le gradient d'humidité dH/dZ*

élevées. Le fait que D soit fonction croissante de H implique par conséquent que le coefficient angulaire de la corde OM augmente à mesure que H augmente et que par conséquent les débits q considérés en ordonnées diminuent. S'il était prouvé au contraire que D était constant, la série des points (q, dH/dz) relatifs aux profondeurs successives et par conséquent à des humidités différentes, devrait s'aligner sur une droite passant par l'origine et dont le coefficient angulaire traduirait la valeur de la constante D.

A quel type de courbes est-on conduit en réalité, si l'on porte sur un graphique les points (q, dH/dz) résultant d'un dépouillement tel que celui effectué au tableau 1 (voir fig. 10). Une première série de points correspondant aux couches les plus superficielles s'aligne sur une droite qui ne passe pas par l'origine. Par ailleurs, d'un laps de temps $t_0 - t_1$ aux temps suivant $t_1 - t_2$, $t_2 - t_3$, etc., la droite correspondant aux niveaux supérieurs présente un coefficient angulaire de plus en plus faible.

En fait, il s'agit encore là d'un résultat expérimental que le première loi trouvée (loi de variation de u en fonction de z) permettait de prévoir ainsi que le montre le calcul suivant.

Limitons-nous aux tranches supérieures pour lesquelles les variations avec la profondeur de la vitesse de desséchement u et du débit q sont données par

$$u = u_o \exp(-a_1 z) \tag{II.10}$$

et

$$q - \mathrm{B} = \frac{u_o}{a_1} \exp(-a_1 z). \tag{II.14}$$

Dans (II.10), remplaçons u par sa valeur en fonction de dH/dt

$$-\frac{\sigma}{10}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial t} = u_o \exp(-a_1 z) \tag{II.19}$$

et intégrons dans le temps

$$\mathrm{H}_o - \mathrm{H} = \frac{10}{\sigma} \exp(-a_1 z) \int_o^t u_o \mathrm{d}t \tag{II.20}$$

Dérivons maintenant par rapport à z de façon à faire apparaître le gradient d'humidité

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial z} = \frac{10\, a_1}{\sigma} \exp(-a_1 z) \int_o^t u_o \mathrm{d}t. \tag{II.21}$$

Or la formule (II.14) permet de remplacer exp $(-a_1 z)$ par l'expression $\frac{a_1}{u_0}(q\text{-B})$ et la formule (II.21) devient

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial z} = \frac{10\, a_1^2}{\sigma} \frac{(q-\mathrm{B})}{u_o} \int_o^t u_o \mathrm{d}t \tag{II.22}$$

soit si l'on veut exprimer le débit q en fonction du gradient d'humidité dH/dz.

$$q = \mathrm{B} + \frac{\sigma\, u_o}{10\, a_1^2 \int_o^t u_o \mathrm{d}t} \cdot \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial z} \tag{II.23}$$

On voit que le coefficient figurant devant dH/dz décroît avec le temps puisque l'intégrale figurant au dénominateur ne peut que croître. D'ailleurs dans le cas

particulier où u_0 demeure constant dans le temps (ce qui est le cas durant la première phase d'expérience au cours de laquelle le desséchement superficiel du sol n'intervient pas encore pour réduire l'évaporation), on a alors $\int_0^t u_0 \mathrm{d}t = u_0 t$ et l'équation devient plus simplement

$$q = \mathrm{B} + \frac{\sigma}{10\, a_1^2 t} \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial z} \qquad \text{(II.24)}$$

Le coefficient figurant devant $\partial \mathrm{H}/\partial z$ apparaît alors inversement proportionnel au temps. Il y a donc accord entre l'équation à laquelle on aboutit par le calcul, calcul établi lui-même sur la base d'une première loi expérimentale, et les droites données directement par l'expérience (fig. 10). Mais, y a-t-il accord entre ce résultat et les considérations théoriques concernant la variation de D avec l'humidité H ? C'est ce que l'on va examiner à présent.

VI. — Non-validité de l'équation de diffusion dans un sol en voie de dessèchement

Les résultats exposés ci-dessus sont-ils conformes aux équations théoriques de la diffusion (cf. chap. I) ? Pour le vérifier, on peut entre autres choses, reconsidérer la formule (1.3) donnant le débit q en fonction du gradient d'humidité

$$q = \mathrm{D} \frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}z}$$

et rechercher comment le coefficient de diffusivité D varie en fonction de H.

Revenons à cette expérience qui consiste à évaluer à un certain nombre de niveaux proches de la surface d'une part, le débit q, d'autre part, le gradient d'humidité $\mathrm{dH}/\mathrm{d}z$.

Le quotient de q par $\mathrm{dH}/\mathrm{d}z$ n'est autre que le coefficient de diffusivité D. Ce dernier est à rapprocher de l'humidité H du sol au niveau considéré. Comme on l'a déjà vu à propos de la représentation graphique (q, $\mathrm{dH}/\mathrm{d}z$), le quotient considéré (quotient que l'on peut assimiler à la pente de la corde OM (fig. 9), et l'humidité du sol H augmentent l'un et l'autre de la surface de la colonne de sol vers la profondeur. Dans ces conditions, si l'on porte graphiquement les valeurs trouvées de D en fonction des humidités correspondantes H, on est conduit, comme la théorie le laissait supposer, à une courbe ascendante telle que C_1 (fig. 11) et qui, d'allure quelque peu exponentielle, rappelle celle obtenue par Gardner (fig. 2). Par contre, si l'on recommence la même expérience avec différentes humidités initiales du sol (19 au lieu de 25 par exemple) on obtient sur le graphique (D,H) une autre série de points tout à fait différente (courbe C_2, fig. 11). A humidité égale, le coefficient D apparaît plus élevé quand l'humidité initiale du sol est plus faible. Un tel résultat que l'on pouvait d'ailleurs déduire des équations II.20 à II.23, ne nous paraît guère explicable et apparaît comme une première entorse à la théorie générale de la diffusion de l'eau dans le sol.

Une autre contradiction encore plus manifeste est le phénomène d'une circu-

lation à contre-gradient vers la surface évaporante. Elle peut être mise en évidence de la façon suivante :

Constituons des colonnes de sol telles que la couche supérieure de trois centi-

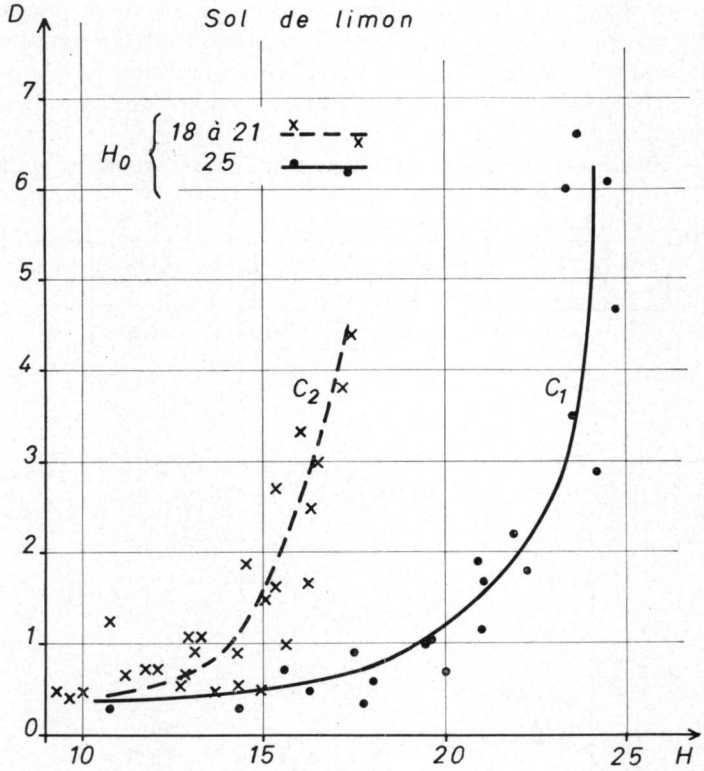


FIG. 11. — *Relations (expérimentales) entre le coefficient de diffusivité D et l'humidité du sol H*

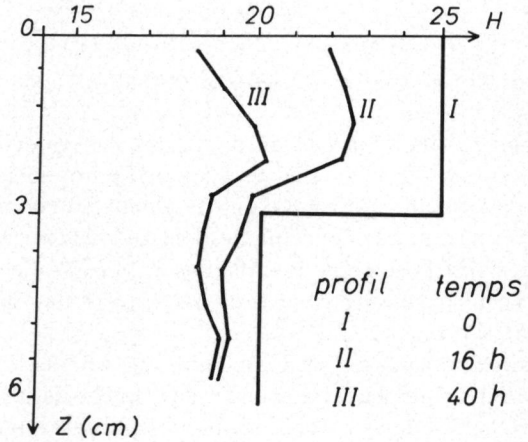


FIG. 12

mètres d'épaisseur ait une humidité de 25 p. 100 par exemple (c'est-à-dire la capacité au champ pour le limon considéré) tandis que les couches sous-jacentes n'ont qu'une humidité de 20 p. 100. Le profil initial est donc représenté par la courbe 1 (fig. 12). Précisons que cette terre à 20 p. 100 d'humidité au moment du remplissage des tubes était auparavant à 25 p. 100 comme celle utilisée pour la couche supérieure et qu'elle a été ramenée à 20 p. 100 par desséchement à l'air libre. Dans ces conditions, la relation entre le potentiel matriciel ψ et l'humidité H était la même dans la couche supérieure humide et la couche inférieure plus sèche ; l'hystérésis ne saurait expliquer le résultat qui suit.

Les colonnes ainsi constituées sont soumises à l'évaporation. Au bout des temps

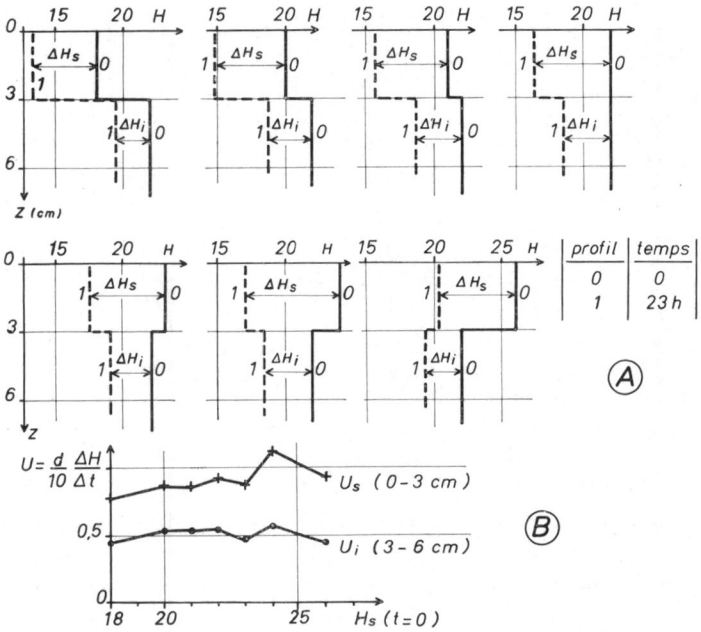


FIG. 13

t_1 et t_2, des colonnes de sol sont sacrifiées successivement pour la détermination de profils hydriques.

L'observation des profils hydriques ainsi obtenus met en évidence un desséchement des couches inférieures dès le début de l'expérience au moment où, cependant, la couche supérieure est encore humide. Ce desséchement provoqué par l'évaporation en surface signifie qu'une certaine quantité d'eau située dans les strates relativement profondes s'est dirigée vers la surface ; mais ce faisant, l'eau est passée contrairement aux lois générales de la diffusion d'une terre sèche vers une autre plus humide, circulant ainsi à contre-gradient.

Si l'eau peut circuler dans un sens contraire à celui que laisserait prévoir le gradient d'humidité dH/dz, on peut se demander dans quelle mesure le débit q dépend malgré tout de dH/dz. L'expérience suivante tendrait à prouver que q est pratiquement indépendant du gradient d'humidité. Soit une série de colonnes de sol constituées

de façon que l'humidité des couches inférieures (profondeur supérieure à 3 cm) soit la même dans toutes les colonnes et égale à 22 p. 100 et que, par contre, l'humidité des 3 premiers centimètres de sol varie d'une colonne à l'autre de 18 à 26 p. 100. Les profils hydriques initiaux sont ainsi représentés par les courbes en trait plein de la figure 13 A. Au bout d'un certain temps (24 heures) pendant lequel les colonnes ont été soumises à l'évaporation, on détermine les nouvelles humidités dans les deux couches 0-3 et 3-6 cm. On aboutit aux profils hydriques représentés en trait discontinu, fig. 13 A. Les variations d'humidité ΔH_s et ΔH_i observées dans les deux tranches 0-3 et 3-6 permettent d'évaluer les vitesses de desséchement correspondantes u_s et u.

Le graphique de la figure 13 B montre que u_s et u_i sont indépendants de l'humidité initiale H_s. C'est dire que le débit q à 3 cm de profondeur, était indépendant du gradient d'humidité au même niveau.

Ainsi la circulation de l'eau dans un sol en voie de desséchement peut se faire à contre-gradient d'humidité ou autrement dit, à contre-gradient de potentiel si l'on admet que le potentiel agissant alors sur la circulation est uniquement le potenciel matriciel ψ tel qu'il est habituellement défini en fonction de l'humidité H. De plus, le débit q n'apparaît même pas influencé par la valeur du gradient d'humidité dH/dz et par corollaire du gradient de potentiel matriciel $d\psi(H)/dz$.

Il est évidemment contraire aux lois les plus élémentaires de la physique qu'un corps se déplace spontanément à contre-gradient de potentiel. Ces expériences signifient donc que le potentiel agissant sur les mouvements de l'eau n'est pas uniquement le potentiel matriciel fonction de l'humidité, $\psi(H)$. Ainsi, au cours du desséchement du sol, le potentiel total Φ qui provoque la circulation de l'eau, comprend d'autres termes que $\psi(H)$ et ces autres termes ont une action prépondérante. L'action du potentiel newtonien ne peut être envisagée pour expliquer l'anomalie constatée, puisque dans l'expérience précitée de circulation à contre-gradient, l'eau se déplaçait de bas en haut donc, là également, à contre-gradient de potentiel. Il ne peut s'agir non plus de l'action indirecte d'un gradient de température qui serait susceptible de provoquer un déplacement de l'eau par thermo-osmose ou à l'état de vapeur. L'expérience a montré en effet que rien n'était changé dans le desséchement du sol et la circulation de l'eau selon que l'évaporation était activée par des lampes électriques ou par un ventilateur. Or, avec les lampes, le gradient de température $d\theta/dz$ est négatif tandis qu'il est positif sous l'effet du courant d'air provoqué par le ventilateur. L'effet de la température semble donc négligeable dans le phénomène étudié.

Nous avons voulu vérifier également que la concentration saline, c, n'avait aucun rôle. Homogène au départ, cette concentration peut présenter un gradient dc/dz dès qu'une certaine quantité d'eau s'est déplacée et s'est évaporée en abandonnant en surface les sels dissous. Là encore, l'action supposée est apparue négligeable. En étudiant le mécanisme des déplacements de l'eau sur la base d'une des représentations graphiques indiquées [$u(z)$ ou $u(q)$ par exemple], on ne constate aucune différence sensible selon que le matériau a été préhumecté avec de l'eau distillée ou une solution de chlorure de sodium.

En définitive, dans son déplacement vers la surface évaporante, au sein d'un sol en voie de desséchement, l'eau est soumise à un potentiel efficace Φ différent du potentiel matriciel ψ tel qu'il peut être déterminé en fonction de l'humidité H du sol

$$\Phi \neq \psi(H).$$

Le potentiel agissant sur les mouvements de l'eau comprend un autre terme dont le rôle sur la circulation semble prépondérant et qui ne concerne ni la pesanteur ni la pression osmotique, ni la température.

Nous allons expliquer à présent comment le potentiel régissant les mouvements de l'eau dans le sol est différent de $\psi(H)$ lorsque la terre, siège du transport, joue en même temps et à toute profondeur le rôle de source.

Chapitre III

NOTION DE POTENTIEL EFFICACE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

I. — L'image des deux mouvements liquides dans un sol en voie de desséchement : le sol source de la circulation et siège du transport

Les itinéraires empruntés par l'eau dans son déplacement (films liquides et canalicules pleins d'eau à l'humidité considérée) forment un enchevêtrement chaotique ; ils sont orientés selon toutes les directions et présentent entre eux une continuité plus ou moins bonne.

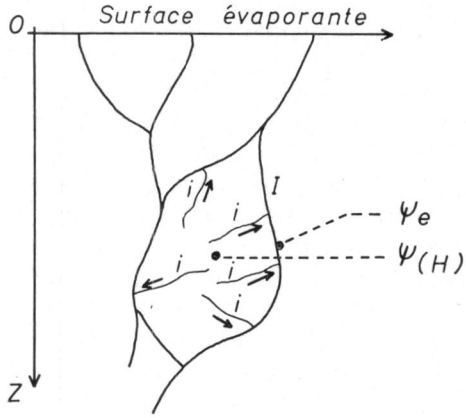


Fig. 14

Nous allons imaginer un classement de ces itinéraires en deux catégories distinctes selon le rôle qu'ils jouent (fig. 14).

Si certains itinéraires, qu'on désignera par (I), s'écartent peu de la direction générale du mouvement et présentent entre eux une bonne continuité, ils sont appelés à jouer un rôle essentiel dans le mouvement général de l'eau vers la surface évapo-

rante. Nous admettons que c'est par ces voies privilégiées (I) qu'est assuré le débit q observé macroscopiquement.

Ces voies (I) ramifiées entre elles, enserrent des mailles à l'intérieur desquelles se trouvent les autres itinéraires (i) qui seront orientés selon toute direction.

Ces voies secondaires (i) débouchent dans les voies (I). Elles sont le siège d'une circulation microscopique uniquement divergente et dont le seul rôle est de dessécher la maille. La circulation n'est que divergente ; en effet, si de l'eau pénétrait dans la maille par un canalicule $(i)_1$ et en ressortait par un ou des canalicules $(i)_2$, l'ensemble $(i)_1$-$(i)_2$ constituerait par définition même un itinéraire primaire (I) responsable du débit macroscopique.

Par ailleurs, si la circulation dans les mailles n'est que divergente, le débit liquide dans les canalicules (i) n'a d'autre effet que de vider la maille, ou si l'on veut, de dessécher le sol au niveau considéré et augmenter ainsi le débit macroscopique q dans les itinéraires I.

En terme d'hydrodynamique, nous dirons que la maille et les canaux (i) qui la parcourent, constituent une source.

Cette superposition de deux courants distincts dont un seul est responsable du débit observé macroscopiquement, répond d'ailleurs à l'évidence si l'on imagine, par exemple, le mélange d'argiles et d'éléments sableux ou limoneux ; les interfaces d'argiles joueront le rôle de source sans participer au mouvement général de l'eau vers la surface évaporante.

II. — L'EXPRESSION DU POTENTIEL EFFICACE DE L'EAU

L'image proposée permet facilement d'exprimer le potentiel de l'eau dans les canaux (I). En effet, si l'on porte son attention sur la circulation microscopique à l'intérieur de la maille, l'existence d'un débit dans les canaux (i) implique que le potentiel soit différent à l'extérieur et au centre de la maille. Faisons abstraction de la pression osmotique et admettons qu'au centre de la maille ce potentiel soit $\psi(\mathrm{H})$, qu'il ait en d'autres termes la valeur que l'on détermine habituellement dans les mesures de laboratoire en fonction de l'humidité H ; désignons par ψ_e le potentiel au même niveau mais à l'extérieur de la maille, c'est-à-dire dans l'itinéraire I ; appliquons enfin à l'ensemble des canaux (i) la loi générale de diffusion. Le débit, selon des directions $x'x$ quelconques, sera

$$q_i = \lambda_i \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}x} \cdot \qquad \text{(III.1)}$$

Le gradient $\mathrm{d}\psi/\mathrm{d}x$ peut s'écrire

$$\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}x} = \frac{\psi_e - \psi(\mathrm{H})}{\mathrm{L}} \qquad \text{(III.2)}$$

L représentant la longueur moyenne de parcours du centre à la périphérie de la maille. Par ailleurs le débit q_i figurant dans l'équation précédente, débit qui traduit la circulation divergente de l'eau, est proportionnel à la vitesse de desséchement du sol :

$$q_i = \mathrm{K} \frac{\mathrm{dH}}{\mathrm{d}t} \qquad \text{(III.3)}$$

K étant un coefficient que nous ne chercherons pas à expliciter.

L'équation (III.1) devient ainsi

$$K \frac{dH}{dt} = \lambda_i \frac{\psi_e - \psi(H)}{L} . \qquad \text{(III.4)}$$

On en tire l'expression de ψ_e, potentiel efficace de l'eau dans les itinéraires I

$$\psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda_i} \frac{dH}{dt} . \qquad \text{(III.5)}$$

III. — Interprétation des lois expérimentales du desséchement du sol

Rappelons tout d'abord que toutes les relations mises en évidence expérimentalement (relation par exemple entre la vitesse de desséchement u et le débit q ou entre le débit et le gradient d'humidité) découlaient de cette loi de variation exponentielle de la vitesse de desséchement u, avec la profondeur

$$u = u_0 \exp(-az) \qquad \text{(III.6)}$$

où le coefficient a ne varie pas de façon systématique avec l'humidité du sol H mais par contre, présente une variation assez brutale (dans la proportion de 1 à 4), quand u dépasse une certaine valeur critique.

Pour expliquer l'ensemble des résultats rapportés dans le chapitre précédent, nous nous proposons simplement de retrouver par le calcul, la loi exponentielle (III.6) et les résultats concernant le coefficient « a ».

Considérons donc maintenant les canaux (I) où l'eau a pour potentiel

$$\psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda_i} \frac{dH}{dt}$$

et appliquons à nouveau l'équation générale de diffusion qui s'écrit alors

$$q = \lambda_I \frac{d\psi_e}{dz} \qquad \text{(III.7)}$$

la direction $z'z$ n'étant plus ici quelconque, mais correspondant à la direction générale du mouvement, perpendiculaire à la surface évaporante.

On peut remarquer que le gradient de potentiel efficace donné par la somme

$$\frac{d\psi_e}{dz} = \frac{d\psi(H)}{dz} + \frac{KL}{\lambda_i} \frac{d}{dz}\left(\frac{dH}{dt}\right) \qquad \text{(III.8)}$$

peut être d'un signe contraire au gradient de potentiel matriciel $d\psi(H)/dz$. *La circulation à contre-gradient d'humidité s'explique ainsi facilement.*

Par ailleurs, il est possible de retrouver la loi de variation exponentielle de u en fonction de z. A condition d'admettre que dans la somme représentant le gradient de ψ_e (formule III.8), le premier terme est négligeable devant le second, on peut écrire

$$\frac{d\psi_e}{dz} \# \frac{KL}{\lambda_i} \frac{d}{dz}\left(\frac{dH}{dt}\right) \qquad \text{(III.9)}$$

ou en remplaçant dH/dt par $\frac{10\,u}{\sigma}$

$$\frac{d\psi_e}{dz} \# \frac{10\,KL}{\sigma\lambda_i} \frac{du}{dz} .$$

L'équation de diffusion (III.7) s'écrit ainsi

$$q = 10 \frac{\lambda_I}{\lambda_i} \frac{KL}{\sigma} \frac{du}{dz}. \tag{III.10}$$

Dès lors, l'équation de continuité

$$u = \frac{dq}{dz} \tag{III.11}$$

devient si l'on remplace q par l'expression donnée en (III.10)

$$u = 10 \frac{\lambda_I}{\lambda_i} \frac{KL}{\sigma} \frac{d^2u}{dz^2} \tag{III.12}$$

L'intégration de cette équation, compte tenu des conditions aux limites ($u = u_0$ pour $z = 0$ et $u = 0$ pour z infiniment grand), donne

$$u = u_o \exp(-az) \tag{III.13}$$

avec

$$a^2 = \frac{\lambda_i}{\lambda_I} \cdot \frac{\sigma}{10\,KL}. \tag{III.14}$$

L'équation (III.13) n'est autre que la loi (III.6) obtenue par expérience et d'où découlaient toutes les autres relations expérimentales.

On avait constaté par ailleurs que le coefficient « a » figurant dans la loi exponentielle (III.6) ne variait guère avec l'humidité du sol. L'explication en est donnée par la formule (III.14) : au fur et à mesure que l'humidité diminue, λ_i et λ_I diminuent l'un et l'autre et le rapport λ_i/λ_I ne présente pas de variation systématique.

Enfin, l'expérience avait montré que pour un matériau donné, le coefficient a de la loi exponentielle oscillait autour de deux valeurs distinctes a_1 et a_2, la valeur la plus élevée a_1 étant observée quand la vitesse de desséchement u excède une certaine valeur critique u_c. Ce résultat peut être lui aussi expliqué, au moins qualitativement, à partir de l'égalité (III.14) ;

Quand la vitesse de desséchement u est faible, les potentiels de l'eau sont peu différents à l'intérieur de la maille dans les canaux (i) et à l'extérieur dans les canaux (I) ; il en est de même des coefficients de conductibilité λ_i et λ_I et le rapport λ_i/λ_I figurant dans (III.14) est par conséquent voisin de l'unité.

Dans le cas contraire où u est élevé, la différence de potentiel existant entre l'intérieur et l'extérieur de la maille devient importante et le coefficient de conductibilité dans les itinéraires principaux (I), soit λ_I devient plus faible que le coefficient λ_i relatif aux itinéraires (i) parcourant la maille. Le rapport λ_i/λ_I figurant a en (III.14) est alors supérieur à l'unité et le coefficient « a » devient plus élevé. Il y donc accord entre l'explication théorique et l'expérience. On peut seulement se demander pourquoi « a » augmente brutalement et non de façon progressive.

Ainsi, l'image des deux circulations liquides dans les deux sortes d'itinéraires considérés et l'expression du potentiel efficace dans les itinéraires principaux rendent bien compte de l'ensemble des résultats expérimentaux trouvés et permettent notamment d'expliquer la circulation de l'eau à contre-gradient d'humidité.

Quant à l'équation fondamentale de diffusion (III.1), alors qu'elle semblait être à première vue infirmée par l'expérience, c'est elle qui a permis de retrouver et l'expliquer par le calcul les résultats expérimentaux ; mais il a fallu pour cela, l'appliquer successivement aux itinéraires (i) qui assurent au sol sa fonction de source et aux itinéraires (I) qui font du sol le siège de la circulation macroscopique.

Les résultats rapportés ici ne vont donc pas à l'encontre des recherches citées précédemment (chap. I). En régime permanent, le sol ne fait qu'assurer le transport de l'eau, l'humidité H demeure constante dans le temps ($dH/dt = 0$) et le potentiel efficace

$$\psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$$

n'est autre, dans ces conditions, que le potentiel matriciel $\psi(H)$.

Chapitre IV

POTENTIEL EFFICACE DE L'EAU DANS LE SOL ET TRANSPIRATION VÉGÉTALE

I. — Potentiel efficace et pression de succion dans la feuille

Si l'on imagine une masse de sol prospectée par les racines, le schéma donné précédemment de voies primaires et secondaires assurant la circulation de l'eau devient ici encore plus évident. Les itinéraires principaux (I) seront les racines et les radicelles ; les itinéraires secondaires (i) seront les canalicules du sol situés dans les agrégats de terre enserrés par les racines (fig. 15). Ainsi le même raisonnement que précédemment permet d'exprimer le potentiel de l'eau dans le sol au contact même des racines, c'est-à-dire le potentiel efficace pour le végétal :

$$\psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}. \qquad \text{(IV.1)}$$

Le terme L représente maintenant la longueur moyenne de parcours dans le sol jusqu'aux radicelles et est ainsi d'autant plus petit que le chevelu radiculaire est plus dense.

Ainsi, par suite de la microdiffusion de l'eau dans les agrégats de sol jusqu'aux radicelles, l'eau est soumise à une chute de potentiel (ou une élévation de potentiel au sens où l'on entend généralement ce dernier) que l'on peut exprimer par l'expression $\frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{dH}{dt}$. En fait, du sol à la feuille, c'est à une série de chutes de potentiel que l'eau est soumise et la quantité considérée ne correspond qu'à un terme parmi d'autres.

Considérons en effet la pression de succion de l'eau dans la feuille P_s, que l'on appelle encore déficit de pression de diffusion (DPD). Elle détermine le potentiel de l'eau dans la feuille puisque celui-ci est égal à VP_s (V étant le volume spécifique de l'eau).

Du sol [1] où le potentiel total est ψ (H), à la feuille où il est égal à VP_s, l'eau

[1] Pour ne pas alourdir inutilement les équations, nous ferons encore abstraction du potentiel dû à la pression osmotique dont l'influence n'est pas considérée ici.

est soumise à des variations de potentiel correspondant aux énergies perdues par frottement visqueux et liées par conséquent à la circulation ;

— Une variation correspondant à la pénétration dans la racine, soit $(\Delta\psi)_r$;

— Une variation due à la circulation dans les vaisseaux conducteurs $(\Delta\psi)_v$.

Ainsi peut-on écrire (en négligeant les variations de potentiel newtonien) :

$$VP_s = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt} + (\Delta\psi)_r + (\Delta\psi)_v. \qquad (IV.2)$$

Les deux premiers termes figurant au second membre constituent ce que nous avons appelé le potentiel efficace de l'eau dans le sol et désigné par ψ_e. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol est donc une composante du potentiel de l'eau dans la feuille et dont l'importance est primordiale comme on va le voir.

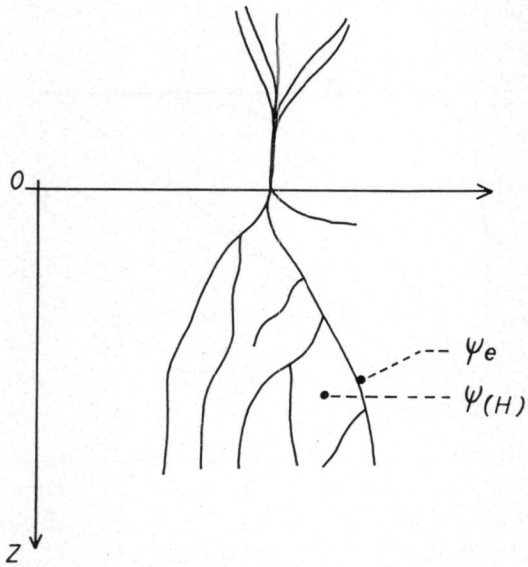


FIG. 15

On trouvera dans un travail récent (VISSER, 1962) une analyse du phénomène de la transpiration végétale qui, sous une forme mathématique quelque peu différente de la nôtre, lui est cependant très similaire.

II. — RÉGULATION STOMATIQUE ET RÉDUCTION DE LA TRANSPIRATION

a) *Données expérimentales*

Nombreuses sont les recherches effectuées dans le but de préciser jusqu'à quelle limite inférieure H_c de l'humidité les stomates demeurent ouverts et l'évapotranspiration maximale (KELLEY, 1953 — LEMON, 1956 — LOWRY, 1954 — SLATYER, 1959 — VEIHMEYER, 1955).

On sait à quel point les résultats obtenus sont différents. VEIHMEYER a constaté que l'évapotranspiration E demeurait maximale sur la quasi-totalité de la gamme d'humidité (fig. 16, courbe A) ; RICHARDS a observé au contraire une décroissance régulière de E, lorsque l'humidité diminue elle-même de la capacité au champ au point de flétrissement permanent (fig. 16, courbe C) ; d'autres auteurs enfin ont trouvé des courbes E(H) intermédiaires entre ces deux cas extrêmes (fig. 16, courbe B).

Les recherches effectuées en matière d'irrigation et qui consistent à faire intervenir une réserve en eau plus ou moins importante en laissant le sol se dessécher jusqu'à une humidité plus ou moins faible, ont conduit également à des résultats contradictoires. Tantôt, les rendements obtenus sont indépendants de la réserve mise en jeu, ce qui laisse penser que l'eau est tout autant disponible pour le végétal sur toute l'étendue de la gamme d'humidité utile. Parfois au contraire, les rendements sont d'autant plus élevés que les irrigations ont été plus fréquentes et que l'humidité a donc été maintenue plus élevée (STANHILL, 1957).

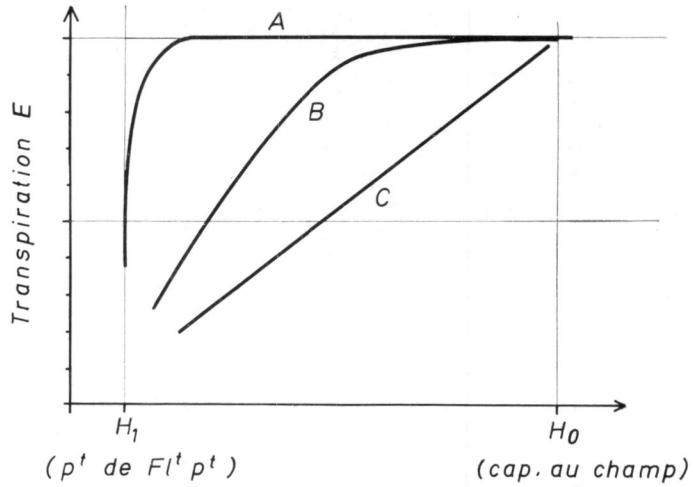


FIG. 16. — *Variations relatives de la transpiration en fonction de l'humidité du sol H*

Essayant d'analyser les raisons de ces désaccords, on a mis notamment en évidence l'influence de l'évapotranspiration potentielle instantanée, de la profondeur et de la densité du système radiculaire et de la conductibilité du sol pour l'eau (HAGAN et *al.*, 1959).

Si l'on désigne par H_c l'humidité critique pour laquelle l'évapotranspiration commence à diminuer au-dessous de sa valeur potentielle, on constate que H_c est d'autant plus élevée que l'évapotranspiration potentielle est plus forte. Ainsi à une humidité donnée l'évapotranspiration est maximale si ETP est faible ; elle est au contraire réduite quand ETP dépasse une certaine valeur.

C'est bien d'ailleurs ce qui ressort de l'examen de la régulation stomatique. Au cours d'une journée, on constate (de Parcevaux S 1963)que les stomates sont ouverts au début et à la fin de la journée quand ETP est faible et qu'ils se ferment, ce qui a pour effet de réduire l'évapotranspiration, en milieu de journée quand ETP est élevée.

On a par ailleurs montré que H_c était d'autant plus faible, et qu'ainsi la réserve facilement utilisable était plus élevée, que le système radiculaire était plus développé.

Signalons enfin que l'expérience a permis de mettre en évidence le rôle de la conductibilité du sol pour l'eau. En comparant les évapotranspirations réelles d'une même culture croissant dans des sols de texture différente, on constate que pour un même potentiel $\psi(H)$, l'évapotranspiration est réduite davantage dans le sol le plus grossier, celui dont la conductibilité pour l'eau est la plus faible.

b) *Interprétations*

On peut admettre que la fermeture des stomates se produit (indépendamment de l'action de la lumière) quand la pression de succion dans la feuille P_s atteint une certaine valeur critique $(P_s)_c$; dès lors, il suffit de reconsidérer l'équation

$$VP_s = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt} + (\Delta\psi)_r + (\Delta\psi)_v \qquad \text{(IV.2)}$$

pour constater que l'humidité H est loin d'être le seul facteur déterminant la réduction de la transpiration végétale et pour expliquer les observations rappelées ci-dessus.

Remarquons que les trois termes dH/dt, $(\Delta\psi)_r$ et $(\Delta\psi)_v$ sont proportionnels à l'évapotranspiration réelle E et que par ailleurs dH/dt est inversement proportionnel à la masse de sol M soumise au desséchement. La formule (IV.2) peut donc s'écrire :

$$VP_s = \psi(H) + k_1 \frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{E}{M} + k_2 E \qquad \text{(IV.3)}$$

k_1 et k_2 étant des coefficients.

Ainsi, pour que la pression de succion dans la feuille atteigne la valeur critique $(P_s)_c$ (valeur voisine semble-t-il de 8 à 10 atmosphères (MÉRIAUX, 1963) il faut que l'évaporation atteigne la valeur E_c donnée par

$$E_c = \frac{(VP_s)_c - \psi(H)}{\dfrac{k_1\,KL}{\lambda M} + k_2}\,. \qquad \text{(IV.4)}$$

Cette valeur critique de l'évaporation sera aussi une valeur maximale puisqu'elle déclenche la fermeture des stomates. On voit que le débit maximal [1] qui peut être assuré par une culture dépend certes de l'humidité du sol H (qui détermine λ et ψ) mais également de la masse de sol M prospectée par les racines et de la densité du chevelu radiculaire (dont dépend L).

Ainsi, tant que l'évapotranspiration potentielle ETP demeure inférieure à la valeur critique (ou maximale) E_c indiquée ci-dessus, ETR reste égal à ETP ; il y a au contraire un « décrochement » lié au phénomène de régulation stomatique quand ETP dépasse la valeur critique en question.

La formule (IV-4) permet donc de comprendre que la régulation stomatique dépende de la valeur instantanée de ETP. Elle montre de même que ce phénomène interviendra d'autant plus souvent que la masse de sol M soumise au desséchement est plus faible et que le chevelu radiculaire est moins dense. En effet le débit maximal E_c est fonction croissante de M et fonction décroissante de L. Elle

[1] Cette évapotranspiration maximale ou débit maximal assuré par la culture est désignée par le symbole (q_1) max. dans les articles de BOUCHET, de PARCEVAUX et de GUYOT (1963)

met enfin en évidence le rôle de la conductibilité du sol pour l'eau λ, conductibilité qui dépend de l'humidité H mais aussi de la texture du sol.

Les observations mentionnées plus haut s'expliquent ainsi facilement.

En définitive, si l'on appelle réserve utile RU d'un sol le stock d'eau disponible dans la zone des racines obtenu par desséchement jusqu'au point de flétrissement permanent et réserve facilement utilisable RFU, celle que le végétal utilise sans avoir à réduire sa transpiration, RFU tendra vers RU dans la mesure notamment où l'évapotranspiration potentielle est faible et où le système radiculaire est profond et dense.

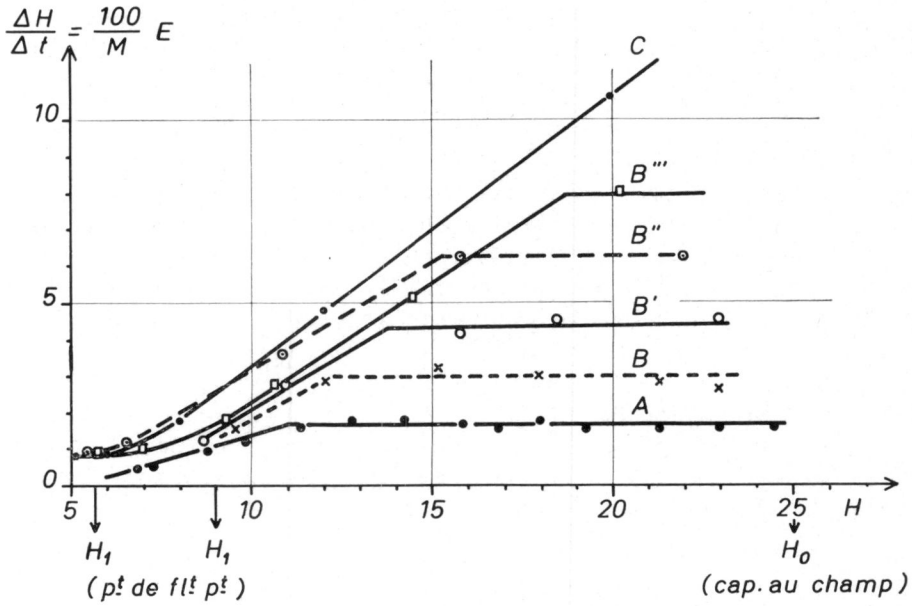


FIG. 17. — *Variation de la vitesse de desséchement du sol (en valeur absolue) en fonction de l'humidité du sol H*

Il convient de rappeler ici une expérience déjà publiée (HALLAIRE, 1960) qui met en évidence l'influence de l'évapotranspiration potentielle et de la masse de sol sur la vitesse de desséchement dH/dt et de cette façon sur la régulation stomatique.

Opérant sur des plantes en pots (blés d'hiver), soumises en laboratoire à des conditions d'évaporation constantes dans le temps, on considère au fur et à mesure du desséchement, la vitesse de desséchement du sol dH/dt que l'on exprime graphiquement en fonction de son humidité H (fig. 17).

Si l'évapotranspiration potentielle est assez faible et la masse de sol assez forte pour que dH/dt soit peu élevé, on constate alors que dH/dt demeure constant sur la quasi-totalité de la gamme d'humidité utile. La réduction de dH/dt (et par suite de la transpiration réelle E) a lieu pour une humidité H_c proche du point de flétrissement permanent. Dans la formule du potentiel efficace, $\psi(H_c)$ est alors élevé, tandis que le terme $\frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{dH}{dt}$ est faible. Si au contraire, les végétaux sont soumis à une évapotranspiration potentielle élevée et si la masse de sol offerte aux racines

est faible, la valeur dH/dt correspondant aux conditions d'évapotranspiration potentielle est élevée ; on constate alors que dH/dt (et par suite E) diminuent régulièrement en même temps que l'humidité. La réduction de la transpiration a donc lieu au voisinage même de la capacité au champ. Dans la formule du potentiel efficace, le potentiel matriciel $\psi(H_c)$ est alors faible tandis que le terme $\frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{dH}{dt}$ est élevé.

Entre ces deux extrêmes, on rencontre évidemment tous les cas intermédiaires.

Les différentes courbes obtenues dans cette représentation (dH/dt — H) traduisent les mêmes résultats que les courbes donnant la variation relative de la transpiration E en fonction de H (fig. 16), mais elles mettent en évidence les raisons des divergences observées.

III. — Conséquences agronomiques et écologiques

a) *Production agricole et évapotranspiration potentielle*

On sait que plus l'évapotranspiration potentielle est grande, plus la réserve utile du sol sera épuisée rapidement. Cette remarque suffirait à justifier les tentatives qui peuvent être faites pour réduire ETP et retarder ainsi le moment où le stock d'eau disponible étant épuisé, la plante est condamnée au flétrissement.

Les considérations qui précèdent apportent une autre raison de penser que toute réduction de ETP est bénéfique pour la culture puisque bien avant l'épuisement des réserves le végétal réduit ou non sa transpiration selon que ETP est faible ou forte.

Les rendements risquent ainsi d'être plus élevés les années où le pouvoir évaporant de l'air est relativement faible. De même, et abstraction faite de tous les autres facteurs agissant sur la production, celle-ci sera plus élevée dans les lieux abrités que sur les plateaux largement découverts et spécialement venteux. On conçoit enfin facilement l'intérêt que peuvent présenter à ce point de vue les brise-vent (cf. article de Guyot, 1963).

b) *Le problème de l'enracinement*

La réserve en eau utile RU est sensiblement proportionnelle à la profondeur d'enracinement.

Quant à la réserve facilement utilisable RFU, elle présente (sous des conditions de climat et de sol données) une fraction de RU d'autant plus grande que le système radiculaire est plus profond.

Il en résulte que la réserve facilement utilisable augmente avec la profondeur de la frange radiculaire plus que proportionnellement.

Rappelons par ailleurs que RFU augmente avec la densité du chevelu radiculaire.

On voit ainsi l'importance qu'il convient d'attacher à l'enracinement, problème qui demeure encore mal connu. On peut se demander toutefois si les associations culturales (Baldy CH. 1963) ne conduisent pas à une meilleure exploitation du sol etdu sous-sol et si leur intérêt économique ne peut en partie s'expliquer ainsi.

c) *Irrigation*

L'irrigation devrait en principe être pratiquée aussitôt que la réserve facilement utilisable RFU est épuisée et qu'intervient le mécanisme de défense de la plante contre la sécheresse.

Comme on l'a vu RFU représente une fraction très variable de la réserve utile RU. Cette fraction étant d'autant plus faible que l'évapotranspiration potentielle est élevée, on devra se fixer, tout autre condition égale, des doses plus faibles dans les zones arides que dans les régions subhumides, plus faibles notamment dans le Midi que dans le nord de la France. De plus, la pratique de l'irrigation n'exclut pas les méthodes tendant à réduire ETP telles que les implantations de brise-vent.

Le rapport RFU/RU augmentant avec la densité et la profondeur du système radiculaire, les doses devront être très inférieures à RU pour le gazon ou les cultures maraîchères à faible enracinement et pourront correspondre au contraire à une fraction plus importante de RU pour des cultures bien enracinées comme les légumineuses fourragères.

Par ailleurs, la pratique de l'irrigation ne dispense pas de rechercher toutes les solutions qui améliorent l'enracinement.

Le rapport RFU/RU sera spécialement faible dans les sols à texture grossière dans la conductibilité λ est, à potentiel matriciel égal, relativement petite. Un sol sableux doit donc être maintenu si possible à des humidités égales ou même supérieures à la capacité au champ (quitte à ce qu'une certaine quantité d'eau percole en profondeur.)

Remarquons enfin que de toute façon, les méthodes classiques d'irrigation où le sol est soumis à un certain desséchement dans l'intervalle de temps séparant deux arrosages successifs n'empêchent pas systématiquement le phénomène de régulation stomatique de se produire ; celui-ci interviendra très généralement aux heures les plus chaudes où ETP est élevée. Ainsi, le fait de rapprocher les irrigations pour maintenir l'humidité élevée, l'implantation de brise-vent pour réduire ETP, la pratique des associations culturales pour augmenter l'enracinement en profondeur et en densité et réduire par là même dH/dt, ne constituent bien souvent que des palliatifs. On conçoit ainsi (toute considération économique n'étant pas envisagée ici) l'intérêt que peut présenter surtout en région aride cette irrigation quasi-permanente qui consiste à faire fonctionner les asperseurs toutes les 5, 10 ou 15 minutes pour apporter ainsi l'eau au végétal au fur et à mesure de ses besoins, sans plus tenir aucun compte des réserves du sol. Cette méthode semble conduire à des suppléments de rendement très supérieurs à ceux obtenus par les méthodes traditionnelles.

CONCLUSIONS

Quand le sol est soumis au desséchement provoqué par l'évaporation ou par la succion radiculaire, le potentiel efficace de l'eau n'est plus $\psi(H)$ (potentiel matriciel fonction de l'humiditié H) mais $\psi(H) + \frac{KL}{\lambda} \cdot \frac{dH}{dt}$. Il dépend donc de la vitesse de desséchement dH/dt, de la conductibilité du sol λ et de la longueur de parcours L

à l'intérieur des mailles de sol qui, dans le mouvement général de l'eau, jouent le rôle de sources.

La formule proposée, établie par le raisonnement, permet de retrouver l'ensemble des lois expérimentales relatives au desséchement du sol sous l'effet de l'évaporation et de comprendre les phénomènes de régulation stomatique examinés plus loin par de PARCEVAUX. Elle permet en outre d'analyser de façon plus sûre l'influence des facteurs du milieu sur les conditions de croissance et d'aborder dans une optique nouvelle l'étude de certaines techniques culturales comme l'inplantation de brise-vent ou le recours aux associations culturales traités ici même par MM. GUYOT et BALDY.

Nous espérons que ce travail aidera le lecteur à mieux faire la synthèse entre les différents problèmes auxquels est consacré ce numéro des annales et où l'accent porte constamment sur l'aspect dynamique de l'alimentation en eau des plantes, aspect dynamique qui est bien traduit par la présence du facteur temps dans l'expression du potentiel efficace.

On remarquera pour finir que cette étude, qui traite de l'état de l'eau dans les conditions de non-équilibre, trouve sa place dans cette branche de la physique qu'est la thermodynamique des processus irréversibles.

Reçu pour publication en février 1963.

SUMMARY

THE EFFECTIVE POTENTIAL OF WATER IN SOIL UNDERGOING DRYING

The study deals mainly with the mechanism of soil drying under the effect of evapotranspiration. Under these conditions, the soil is the seat of water transfer in the direction of the evaporating surface, but is also the source of a liquid flow representing, at all levels, the sum of amounts of water lost from the layer below.

Experiments show, in particular, that the rate of soil drying $\Delta H/\Delta t$ (decrease in the moisture level H within a unit of time) varies according to depth z, following an exponential law

$$(a) \qquad \frac{\Delta H}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_o exp\ (-az)$$

Furthermore, when the initial moisture of soil is modified, the water flow q is practically independent of the moisture gradient of the soil, contrary to what diffusion equations suggest ; thus it is independent of the gradient of the matrix potential ψ, and it is even possible to have a circulation against the gradient from a dry soil to a soil of higher moisture.

These results suggest that the potential governing water movement is not only the matrix potential, but includes another factor the effect of which preponderates in the drying phase.

The theoretical explanation proposed applies the general equation of diffusion separately to macro- and microdiffusion, corresponding to the functions of water transfer and source of circulation, respectively. It is actually possible to show that the effective potential governing the general circulation of water (or macrodiffussion) is

$$(b) \qquad \psi_e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$$

The corrective factor $\frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$ (in which K is a constant, L is the average distance passed from the source, and λ is the coefficient of soil conductance) simply expresses the drop in potential due to microdiffusion in the « Sources » ;

The expression in the equation (b) explains all the experimental results obtained (law of the exponential variation in the rate of drying), as well as the fact that water may circulate against the moisture gradient.

Applied to the problem of water absorption by plants, the concept of effective potential explains

why the decrease in transpiration depends on the dryness of soil (which determines $\psi[H]$) on the one hand, and on actual evapotranspiration and mass of drying soil (factors which determine dH/dt) on the other.

ZUSAMMENFASSUNG

DAS WIRKSAME WASSERPOTENTIAL IM BODEN BEI AUSTROCKNUNG

Vorliegende Studie betrifft vor allem den durch Evaporation hervorgerufenen Mechanismus der Bodenaustrocknung. Unter solchen Bedingungen ist der Boden Sitz einer Wasserverschiebung in Richtung Verdunstungsflache, bildet aber andrerseits die Quelle des beobachteten Flüssigkeitssolls ; dieses Soll ist auf jeder Stufe nichts anderes als die Summe des durch die darunterliegenden Schichten verlorenen Wassers.

Die Erfahrung zeigt im Besonderen, dass die Bodenaustrocknungsgeschwindigkeit $\Delta H/\Delta t$ (Abnahme des Feuchtigkeitssatzes H pro Zeiteinheit) mit der Tiefe Z sich nach einem exponentiellen Gesetz ändert

$$(a)\ \frac{\Delta H}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_0 \exp.\ (-az)$$

Wenn man ausserdem die ursprünglichen Bodenfeuchtigkeiten ändert, kann man feststellen, dass, gegensätzlich zu dem, was die Diffuxionsgleichheiten voraussagen, das Soll praktisch nicht vom Bodenfeuchtigkeitsgradienten abhängig ist, also auch unabhängig vom Gradienten des Matrix-Potentials ψ ; es ist sogar möglich, eine entgegengesetzte Gradientzirkulation von Trockener nach nässerer Erde zu bewerkstelligen.

Solche Ergebnisse zeigen, dass das die Wasserbewegungen bestimmende Potential nicht nur das Matrix-Potential ist, sondern ein anderes Glied beträgt, dessen Wirkung in der Austrocknungsphase vorherrschend sein könnte.

Die alsdann vorgeschlagene theoretische Erklärung führt dazu, die allgemeine Diffusionsgleichheit der Makro- und Mikrodiffusion die den beiden Funktionen des Bodens : Wasserüberführung und Zirkulation antsprechen, getrennt anzuwenden.

Es ist in der Tat möglich, zu beweisen, dass das die Wasserzirkulation (oder Makrodiffusion) befehlende wirksame Potential

$$(b)\ \psi e = \psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}.$$ ist.

Das verbessernde Glied $\frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$ (in welchem K eine Konstante ist, L die mittlere Länge des Verlaufs in den als Quelle fungierenden Maschen, und λ der Leitfähigkeitskoeffizient des Bodens) drückt ganz einfach den durch Mikrodiffusion in den « Quellen » veranlassten Potentialabfall aus.

Die gefundene Formel (*b*) ermöglicht die Gesamtheit der experimental erhaltenen Resultate zu erklären (Gesetz der exponentialen Variation der Austrocknungsgeschwindigkeit) desgleichen die Möglichkzit für das Wasser, als Gegengradient der Feuchtigkeit zu zirkulieren.

Dem problem der Wasseraufnahme durch die Pflanzen angewandt, gibt der Begriff des wirksamen Potentials eine Erklärung dafür, warum die Abnahme der Transpiration einerseits von der Bodentrockenheit (die (H) bestimmt) und andrerseits von der sofortigen Evapotranspiration und der durch Trocknung betroffenen Bodenmasse (dH/dt bedingend) abhängt.

РЕЗЮМЕ

Эффективный потенциал влажности почв при режиме высыхания.

М. АЛЛЭР (При техническом сотрудничестве г-жи М. Ивон. — Центральная Станция Биоклиматологии. — Национальный Центр Сельскохозяйственных Изследований [Версаль]).

Статья эта трактует главным образом о механизме высыхания почвы под влиянием испарения. Почва является в этих условиях не только центром переноса влаги по направлению к поверхности испарения, но также и источником наблюдаемого расхода влаги; расход этот на каждом уровне является не чем иным как суммой количеств влаги потерянных ниже-лежащими слоями.

Опыты показали, в частности, что скорость высыхания почвы $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ (падение влажности H, в единицу времени), меняется в зависимости от глубины Z по экспоненциальному закону выраженному формулой :

a. $$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)_o exp^{(-az)}$$

К тому-же, если изменить инициальные влажности почв, можно проверить, что в противуположность тому о чем возможно было предполагать судя по уравнениям диффузии, расход q практически не зависит от градиента влажности почвы, и, следовательно не зависит также и от градиента матрического потенциала Ψ; возможно даже получить продвижение по направлению от сухой почвы к почве более влажной, то-есть против градиента влажности.

Такого рода результаты заставляют думать, что потенциал управляющий движениями влаги, не является только потенциалом матрическим, но включает иное понятие, действие которого является преобладающим при фазе высыхания.

Теоритическое об'яснение, которое можно привести в этом случае, состоит в необходимости применять общую формулу диффузии отдельно к макро и к микро-диффузиям которые соответствуют каждой из двух функций почвы : перенос влаги и источник движения. И действительно, есть возможность доказать что эффективный потенциал Ψ_e управляющий общим движением влаги (или макро-диффузией), выражается формулой :

в. $$\Psi_e = \Psi(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$$

Коррективный термин $\frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$ (в котором K — постоянная и L — средняя длинна пути проделываемого влагой в сетке играющей роль источника, а Ψ — коэффициент водопроводимости почвы), является простым показателем падения потенциала вызванного микро-диффузией в « источниках ».

Найденное уравнение (формула — в) позволяет об'яснить сумму результатов полученных экспериментальным способом (закон экспоненциальной вариации быстроты высыхания), также как и возможность для влаги продвижения против градиента влажности.

Примененное к проблеме поглощения влаги растительностью, понятие эффективного коэффициента помогает выяснить благодаря чему уменьшение транспирации зависит с одной стороны от степени сухости почвы (определяющей (H)) а с другой — от мгновенной эвапотранспирации и от массы почвы подверженной высыханию (факторы определяющие dH/dt.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIERHUIZEN H. F., 1961. Plant growth and soil moisture relationships. Arid Zone Research. *Actes du Colloque de Madrid, UNESCO*, 309-314.

CHILDS E. C., 1936. The transport of wather through heavy clay soils. *J. Agr. Sci.*, **26**, 114.

CHILDS E. C., COLIS GEORGE N., 1950. *Proc. R. Soc.*, A, **201**, 392-405.

CHRISTENSEN H. S., 1944. Permeability capillary potential curves for three prairies soils. *Soil. Sci.*, **57**, 381-396.

DERJAGUIN B. V., MELNIKOVA M. K., ZACHOVAEVA N. N., NERPIN S. Y., 1956. Theory of equilibrium and migration of soil moisture at various moisture contents. *Rapports au VIe Congrès international de la science du sol*, 1re Commission, physique du sol, Paris. 291-297.

GARDNER W. R., 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 317-320.

GARDNER W. R., 1958. Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soil. *Highway Reasearch board.*, S. R., **40**, 78-87.

HAGAN R. M., VAADIA Y. et RUSSEL M. B., 1959. Interpretation of plant responses to soil moisture regimes in water and its relation to soils and crops (coordinated by M. B. RUSSEL). *Adv. Agron.*, **11**, 77-98.

HALLAIRE M., Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. agron.*, 143-144.

HALLAIRE M., HENIN S., 1958 *a*. Sur la non-validité de l'équation de conductivité pour exprimer le mouvement de l'eau non saturante dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 1720-1722.

HALLAIRE M., HENIN S., 1958 *b*. Desséchement du sol et évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2151-2153.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. vég.*, 119-130.

HALLAIRE M., 1962. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de desséchement. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 2047-2049.

KLUTE A., BRUCE R. R., RUSSEL M. B., 1956. The application of the diffusitivy concept to soil moisture movement. *VIe Congrès Sci. Sol*, Paris 1re commission, vol. V, 345-352.

LEMON E. R., 1956. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 120-125.

LOWRY W. P., 1959. The falling of evaporative soil moisture loss. A critical evaluation. *Bull. American Meteor Soc.*, **40**, 605-608.

MOORE R. E., 1939. Water conduction from shallow water tables. *Hilgardia*, **12**, 383-401.

MAKKINK G. F., VAN HEEMST H. D. J., 1956. The actual evapotranspiration as a function of the potential evapotranspiration and the soil moisture. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **4**, 67-72.

NIELSEN D. R., 1960. Soil capillary conductivity : comparison of measured and calculated values. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 157-160.

SLATYER R. O., 1956. Evapotranspiration in relation to soil moisture. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **4**, 73-76.

SLATYER R. O., 1959. Availability of water to plants. Arid Zone Research XI. Clim. and Microclim. *Proceed. Canberra Symposium UNESCO*, 159-163.

STANHILL G., 1957. The effects of differences in soil moisture status on plant growth. A review and analysis of soil moisture regime experiments. *Soil Sci.*, **84**, 205-210.

STAPLE W. Y., LEHANE J. J., 1954. Movement of moisture in unsaturated soils. *Canad. J. Agric. Sci.*, **34**, 329-342.

RICHARDS S. J., WEEKS L., 1953. Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurelents on soil colums. *Soils Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 206-220.

VISSER W. C., 1962. A method to determine evapotranspiration in soil monoliths. UNESCO, Recherches sur la zone aride. *Actes du Colloque de Montpellier* (à paraître).

VEIHMEYER F. J., 1955. Rates of evaporation from wet and dry soils and their significance. *Soil Sci.*, **80**, 61-68.

ADDENDUM

Références se rapportant aux Annales Agronomiques, n°s 4 et 5, 1963

BALDY Ch., 1963. Cultures associées et productivité de l'eau. *Ann. agron.*, **14**, (4) 499-544.

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, Évapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. agron.*, **14**, (5).

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. Modification des microclimats et amélioration de la production agricole. *Ann. agron.*, **14**, (4), 429-498.

MÉRIAUX S., 1963. Essai d'interprétation des mesures de pression de succion des feuilles. *Ann. agron.*, **14**, (4), 545-552.

de PARCEVAUX S., 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche, essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. *Ann. agron.*, **14**, (5).

Ann. agron., 1963, **14** (4), 429-488.

LES BRISE-VENT

MODIFICATION DES MICROCLIMATS ET AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION AGRICOLE

G. GUYOT

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

L'auteur a tenté de réunir l'ensemble des résultats cités dans la littérature sur les influences multiples et quelquefois contradictoires des brise-vent :

— Influence sur le vent et, par corollaire, sur les microclimats (bilan thermique — température — bilan hydrique — teneur en gaz carbonique, etc.).

— Influence sur la conservation des sols, et en définitive sur la production végétale.

Dans la recherche d'une amélioration de la production agricole par des interventions sur le climat, l'auteur envisage les améliorations à apporter aux brise-vent déjà existants et pose le problème de leur installation dans des régions où l'intérêt de cette technique n'était pas évident.

PLAN

INTRODUCTION : Historique

I. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE VENT
- 1.1 Nature des différents brise-vent.
- 1.2 Mode d'action des brise-vent.

II. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE MICROCLIMAT
- 2.1 Influence sur l'évapotranspiration.
- 2.2 Influence sur la température de l'air. Étude analytique et interprétations.
- 2.3 Influence sur l'humidité de l'air.
- 2.4 Influence sur le bilan radiatif de la zone protégée.
- 2.5 Influence sur la teneur en gaz carbonique de l'air.

III. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE SOL
- 3.1 Influence sur l'érosion éolienne.
- 3.2 Influence sur le « climat du sol ».
- 3.3 Influence sur les propriétés des sols.

IV. — RÔLE HYDROLOGIQUE DES BRISE-VENT
- 4.1 Sur la répartition des précipitations.
- 4.2 Sur le ruissellement.
- 4.3 Sur la nappe phréatique.

V. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE RENDEMENT
- 5.1 Les inconvénients des brise-vent.
- 5.2 Les avantages des brise-vent.

VI. — LE PROBLÈME DES BRISE-VENT EN FRANCE
- 6.1 Les brise-vent dans les régions méditerranéennes.
- 6.2 La suppression des talus boisés dans les pays de bocage.
- 6.3 Les plaines du Nord et de la région parisienne.

INTRODUCTION

Le problème des brise-vent intéressait déjà les agriculteurs du XVIIIe siècle, si bien que les idées de base qui ont présidé à l'établissement des premiers brise-vent ont évolué. On remarque en particulier que dans chaque pays, la manière de considérer les brise-vent est passée par deux stades. Tout d'abord, on ne s'attacha qu'à leur rôle mécanique ; puis, à la suite d'observations sur des brise-vent établis, on s'aperçut qu'ils exerçaient une influence sur tous les facteurs microclimatiques et par suite sur le comportement des végétaux.

Une des plus anciennes réalisations est certainement l'implantation de brise-vent aux XVIIIe et XIXe siècles, dans les zones littorales de l'Écosse soumises à des vents violents, régions dont ils permirent la mise en valeur (1). Au XIXe siècle, l'emploi de brise-vent dans les friches de l'est de l'Angleterre mit en évidence leur rôle dans l'amélioration des cultures (CABORN, 1957). C'est ainsi que les brise-vent, dont les avantages avaient été révélés, apparurent un peu partout en Europe : Allemagne, Hongrie, Suisse, au début du XIXe siècle.

Cependant, tous ces essais n'eurent qu'une importance locale ; seules les réalisations russes, américaines et danoises eurent un retentissement à l'échelon national. En effet, c'est en ces pays que les recherches sont les plus avancées en la matière.

Tous ces pays ont un caractère commun : ils possèdent de vastes étendues dépourvues d'arbres. La nécessité de la création de rideaux d'arbres s'est fait sentir quand l'agriculture s'est étendue à de vastes espaces où le facteur limitant était l'humidité. Des rideaux d'arbres furent établis dans le but de conserver l'humidité du sol, de réduire l'évaporation, d'empêcher l'érosion éolienne des sols légers et friables et de contrôler la répartition de la quantité de neige. C'est ainsi qu'on entreprit de nombreuses expériences pour trouver les relations existant entre l'implantation des rideaux d'arbres et les modifications du microclimat.

D'après l'exemple russe, on peut chercher les raisons qui ont amené l'établissement des premiers brise-vent (TKATCHENKO, 1950).

La région des steppes méridionales de l'U. R. S. S. possède des sols fertiles, les trois quarts de la superficie étant occupés par des tchernozems. La colonisation remonte au début du XIXe siècle ; à cette époque, une préparation sommaire du sol suffisait pour obtenir un rendement atteignant 20 quintaux de blé à l'hectare. Cette région était alors le grenier de l'Europe au siècle dernier. Or, avec l'extension des surfaces cultivées, les catastrophes agricoles se succédèrent à un rythme de plus en plus accéléré. De 1885 à 1950, la sécheresse a sévi 20 fois dans le Povologié (districts riverains de la Volga depuis Gorki jusqu'à Astrakan) par exemple. Souvent, à la sécheresse s'ajoutent les *soukhoveii* persistants, vents brûlants soufflant d'Asie centrale et grillant les récoltes en quelques heures sur de très grandes étendues. La famine accompagna les sécheresses catastrophiques de 1891, 1906, 1911 par exemple.

Jusqu'à la fin du siècle dernier, peu de tentatives furent entreprises pour lutter contre cette détérioration du climat. Il faut attendre DOKOUTCHAEV (1892)

(1) Il faut mentionner également « la fameuse « Ghouta » de Damas où l'association du peuplier à la culture sous forme de rideaux d'arbres est pratiquée de temps immémoriaux et a conduit à une agriculture stable à haute productivité » (F. A. O., 1956).

pour que les causes de l'apparition de plus en plus fréquente des catastrophes agricoles soient analysées. Cet auteur est le premier à avoir considéré l'équilibre climat-végétation et, à propos du défrichement systématique du sud-est de la Russie d'Europe, il écrivait :

« Tout cela, même sans changement du régime des pluies, devait fatalement amener les résultats suivants :

» — Évaporation accrue à la surface du sol et probablement refroidissement nocturne accentué de ce dernier.

» — Desséchement de sa couche arable et abaissement de sa nappe phréatique.

» — Développement des crues printanières plus étendues et plus rapides.

» — Diminution des réserves d'eau estivales tant dans les cours d'eau que sur les lignes de partage.

» — Tarissement de certaines sources et transformation en bourbier des autres.

» — Accentuation de l'effet nuisible des vents d'est et du sud-est brûlant les récoltes et desséchant les sources en été et des vents froids détruisant les semis de céréales et les arbres fruitiers en hiver et au début du printemps.

» Toutes ces causes ont eu pour effet global d'accentuer le caractère continental du climat en rendant les hivers plus rigoureux et les étés plus torrides. »

Dokoutchaev pensa alors qu'il fallait implanter des rideaux d'arbres pour modifier favorablement le climat de toute cette région et créa la station expérimentale de Kamenaïa Steppe (steppe de pierre) pour étudier l'effet des brise-vent. Mais il faut attendre 1931 pour avoir les premiers résultats. C'est également en 1931 que l'on créa le *Vnialmi*, organisme chargé de l'étude des effets des brise-vent sur le climat.

En Amérique, les brise-vent furent tout d'abord utilisés pour protéger bêtes et gens contre les effets mécaniques du vent. C'est ainsi qu'en 1901, au Canada, on distribua gratuitement des arbres aux paysans de la Prairie pour qu'ils protègent leurs fermes contre le vent. Aux États-Unis, c'est après la grande sécheresse de 1934 que de gros progrès furent réalisés et de 1934 à 1941, 16 200 km² furent protégés dans les grandes plaines du Nord.

Pourtant, en dépit d'une quantité impressionnante de publications, l'influence microclimatique des brise-vent a été très peu étudiée, exception faite d'une étude remarquable de Bates en 1911.

Au Danemark, dès 1866, Dalgas essaya de mettre en valeur les landes sableuses du Jutland grâce aux brise-vent et en 1936, le problème fut abordé d'un point de vue purement physique par des études en soufflerie. Toutes ces recherches permirent de faire du Jutland un pays actuellement très prospère.

En Suisse également, on commença au XIXe siècle par établir des brise-vent pour arrêter les vents froids des montagnes, puis on en vint à les considérer d'un point de vue microclimatique.

Enfin, à l'heure actuelle, les études sur ce problème se sont étendues à l'Allemagne, la Hollande, l'Italie, le Japon, etc.

Après ce rapide tour d'horizon, on constate que partout dans le monde, les brise-vent sont actuellement considérés comme des modificateurs de microclimat. Aussi, dans cette étude, leur rôle à l'égard de celui-ci et leur influence sur la production végétale retiendront particulièrement notre attention.

I. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE VENT

I. 1. — Nature des différents brise-vent

Les brise-vent peuvent être de deux natures différentes.

I. 1. 1. — *Les brise-vent secs ou inertes*

Ce sont par exemple les « cannis » du Midi, les murettes de pierres sèches ou les palissades.

I. 1. 2. — *Les brise-vent vivants*

Ils sont nombreux et variés et comprennent les rideaux d'arbres, les buissons ou encore de simples bandes de plantes annuelles, par exemple seigle, maïs, etc.

I. 2. — Mode d'action des brise-vent

Un certain nombre de facteurs qui influent sur les dimensions de la zone protégée par un brise-vent seront examinés successivement. Auparavant, il est nécessaire d'étudier les effets d'une barrière sur le vent.

I. 2. 1. — *Effets d'une barrière sur le vent*

On se place dans le cas d'une barrière rectiligne, mince par rapport à sa hauteur, de longueur infinie [1], située en plaine et soumise à un vent soufflant normalement à son plan.

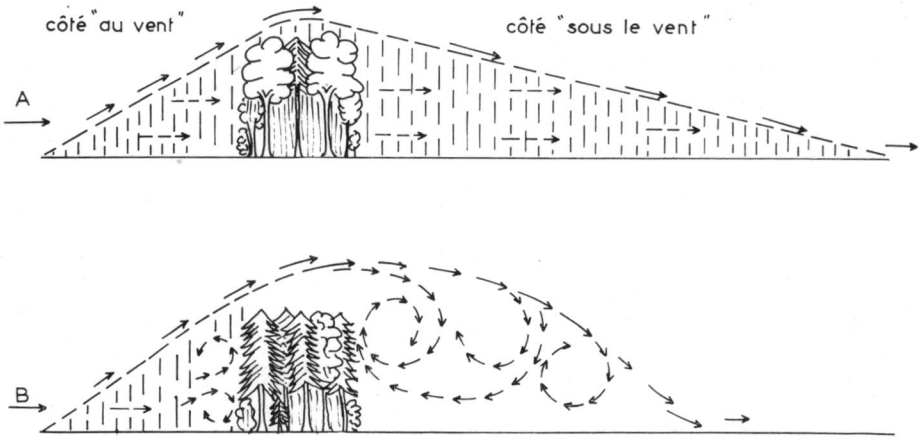


Fig. 1. — *Flux du vent à travers un rideau protecteur modérément pénétrable (A) et dense (B)* (d'après Caborn)

Ce brise-vent délimite deux zones : la zone « au vent » située du côté d'où vient le vent et la zone « sous le vent » située du côté où va le vent (fig. 1).

La barrière, introduite dans un écoulement d'air laminaire, modifie le champ

[1] § 1.2.5.

des vitesses de telle sorte qu'il est possible de distinguer, à son voisinage, plusieurs secteurs nettement différenciés :

— Du côté « au vent », une partie du flux incident continue sa trajectoire sans être déviée, mais la résistance à l'écoulement opposée par la barrière provoque une augmentation de la pression. Il se forme ainsi une sorte de coussin d'air sur lequel glisse l'autre partie du flux incident (fig. 1).

— Au-dessus de la barrière se trouve une zone où le gradient de vitesse est élevé. En effet, la partie du flux défléchie est comprimée contre les couches supérieures ; ceci se traduit par un accroissement de la vitesse de l'air, lequel ne se manifeste pas immédiatement au sommet de la barrière mais à une certaine distance au-dessus (fig. 2-3).

— Du côté « sous le vent » se forme également un coussin d'air correspondant à un ralentissement du vent et à une baisse de pression. Ce coussin est plus étendu que du côté « au vent » et immédiatement au-dessus de lui la répartition des vitesses horizontales reprend progressivement son aspect initial.

1. 2. 2. — *Délimitation de la zone protégée*

Lorsqu'on parcourt la littérature relative aux brise-vent, on constate que peu d'auteurs sont d'accord quant à la longueur de la zone protégée. Cette longueur proportionnelle à la hauteur *h* du brise-vent est généralement exprimée en multiples de *h*.

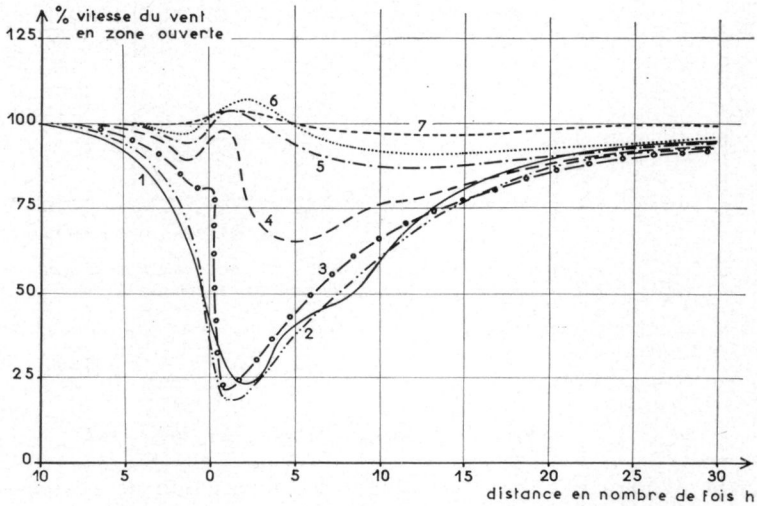


FIG. 2. — *Ralentissement du vent par une barrière dense de 2,20 m de haut, ayant 15 à 20 p. 100 de vides, à différentes hauteurs et à différentes distances.*

Pour la signification des différentes courbes, voir légendes fig. 3

(d'après NAGELI)

On trouve tous les intermédiaires possibles entre 5 et 40 fois la hauteur (BODEUX, 1956 ; de BOIXO, 1960 ; Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc, 1961 ; MARION, 1960). Ces différences dans les résultats expérimentaux sont dues, d'après CABORN (1957) à des causes multiples, principalement :

1°) Largeur et forme du profil transversal des brise-vent étudiés.

2°) Degré de perméabilité au vent.

3°) Direction et vitesse du vent au moment de la mesure.

4°) Niveau de mesure adopté et hauteur de la couverture végétale.

Mais pour apprécier l'effet d'un brise-vent, il faut disposer d'un critère. Si l'on prend comme tel une réduction de 20 p. 100 de la vitesse du vent à une hauteur de 1,40 m (NÄGELI, 1946), on peut considérer que, dans les conditions moyennes, la zone protégée s'étend à une distance égale à une fois la hauteur du côté au vent et 15 à 20 fois la hauteur du côté sous le vent.

Par ailleurs, la zone protégée présente une certaine extension dans le plan vertical et sa hauteur est en général supérieure à celle du brise-vent (fig. 2-3) ; ainsi, s'explique les sensibles augmentations de rendement obtenues avec des brise-vent de taille à peine supérieure à la culture.

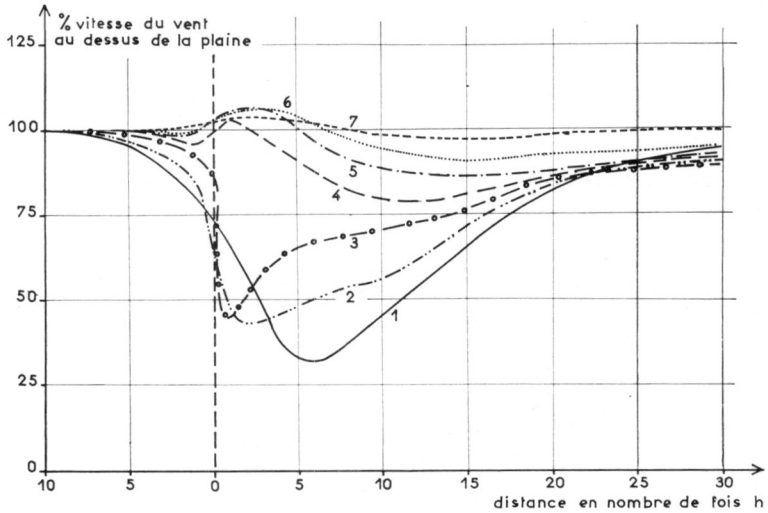


FIG. 3. — *Ralentissement du vent par une barrière pénétrable de 2,20 m de haut, ayant 45 à 55 p. 100 de vides, à différentes hauteurs et à différentes distances*

Hauteurs où ont été effectuées les mesures : (1) 0,55 m ; (2) 1,10 m ; (3) 2,20 m ; (4) 3,30 m ; (5) 4,40 m; (6) 5,50 m ; (7) 8,80 m.

(d'après NÄGELI.)

1. 2. 3. — *Effets de la pénétrabilité d'un brise-vent*

On vient d'indiquer qu'une des causes de la variation de l'extension de la zone protégée est la variation de pénétrabilité des brise-vent.

PANFILOV (1936) a étudié l'effet de la structure des brise-vent sur la vitesse du vent à leur voisinage et la même année, DENUYL, a établi que l'effet d'abri est directement proportionnel à la densité du rideau protecteur. NÄGELI (1953) a également étudié, ce problème et examiné, à l'aide de fumées, les phénomènes qui se produisaient lors du franchissement du brise-vent.

Le flux d'air arrivant sur une barrière se divise en deux parties :

1°) Une partie plus ou moins importante selon la perméabilité du brise-vent est déviée et passe au-dessus.

2°) Le reste continue sa course normalement et traverse le brise-vent.

Le flux initial étant divisé et le débit de l'air à l'arrière du brise-vent réduit, la vitesse elle-même diminue. Mais de plus, la partie du vent qui n'est pas déviée, rencontrant tout d'abord le coussin d'air à vitesse réduite, puis la barrière, perd à l'un et à l'autre de ces deux niveaux une partie de son énergie cinétique.

Si l'on considère un brise-vent peu pénétrable au vent (fig. 1 B), la plus grande partie du flux d'air incident est déviée. Dès lors, du côté sous le vent, la pénétration de l'air étant très faible, il se produit une dépression qui crée une force de succion agissant sur les filets d'air passant au-dessus du brise-vent. Il en résulte la formation d'un tourbillon à l'arrière du brise-vent et une diminution de la longueur de la zone protégée.

On voit ainsi qu'une faible perméabilité provoque une diminution de la vitesse du vent beaucoup plus importante mais que, par suite de la création de tourbillons, la zone d'efficacité est beaucoup plus réduite (fig. 1-2-3).

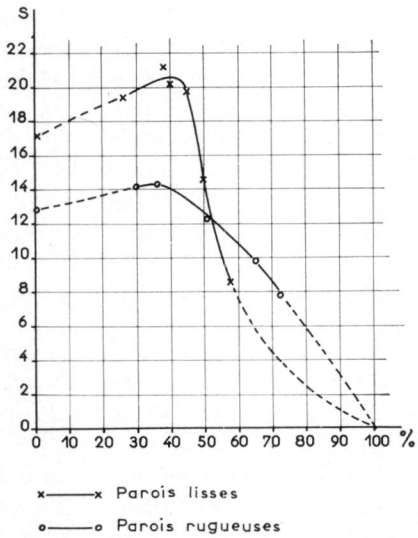


FIG. 4. — *Variation de la protection exercée par un brise-vent en fonction de sa perméabilité*
en abscisses : pourcentage d'ouvertures dans la surface frontale ;
en ordonnées : pour chaque type de brise-vent étudié, valeur de la surface comprise entre la courbe de réduction du vent et l'axe des abscisses (d'après JENSEN).

Il existe donc une perméabilité optimale. Sur la base d'études en soufflerie, celle-ci se situe autour de 48 p. 100 (BLENK et TRIENES, 1956) (48 p. 100 de trous dans la surface frontale du brise-vent, les ouvertures étant uniformément distribuées sur toute la surface). JENSEN (1954) de son côté, a établi que la perméabilité géométrique optimale est de 35 à 40 p. 100 (fig. 4).

S'il est facile de définir la perméabilité géométrique d'un brise-vent sans épaisseur, par contre, le problème devient très ardu lorsqu'il s'agit de définir la perméabilité de haies ou de rideaux d'arbres. En effet, elle intègre la porosité de l'ensemble et la tortuosité des trajets suivis par les filets d'air.

On peut remarquer sur les figures 2 et 3 que le minimum de vitesse du vent

n'apparaît pas immédiatement contre la barrière mais à une certaine distance du côté sous le vent et qu'il est d'autant plus rapproché de la barrière que celle-ci est moins pénétrable. Cet éloignement du minimum s'explique très bien si l'on considère les phénomènes accompagnant le passage du flux d'air à travers la barrière. Du côté « sous le vent », à chaque orifice, correspond une zone d'accroissement de vitesse (effet de VENTURI) et, à chaque partie pleine, une zone de dépression.

L'homogénéisation du profil des vitesses ne s'effectue pas immédiatement mais à une certaine distance du brise-vent correspondant à la « longueur de mélange ». Le minimum de vitesse est situé à une distance du brise-vent égale à cette « longueur de mélange ». Sa position dépend donc d'une part, de la perméabilité de la barrière et d'autre part, de la dimension des ouvertures. A perméabilité égale, ce minimum est d'autant plus éloigné d'un brise-vent que les dimensions de ses ouvertures sont plus grandes ; mais la réduction de vitesse observée n'est pas influencée et reste la même à des distances identiques (KRENTZ, 1956, 1958 ; NÄGELI, 1956).

Ainsi, il est facile de comprendre que dans l'axe d'une brêche, on observe une augmentation de vitesse pouvant atteindre 20 p. 100, susceptible d'entraîner des dégâts importants aux cultures. Cependant, la perturbation ne prend pas d'extension latérale (NÄGELI, 1946, 1953) et, à une assez faible distance du brise-vent, la réduction du vent est normale.

D'autre part, les brise-vent qui sont élagués à la base, créent immédiatement derrière eux, une zone où la vitesse du vent est accrue (NÄGELI, 1956). Ce fait est bien connu des agriculteurs du Midi de la France qui voient, derrière leurs haies de cyprès dénudées à la base, se former une région où toute culture devient impossible.

1.2.4. — *Effets de la forme et de la largeur du profil transversal*

NÄGELI (1953) a montré que dans un brise-vent, l'épaisseur était de peu d'importance et que le facteur essentiel était la perméabilité au vent. Ses études l'ont amené à considérer qu'une barrière sans épaisseur a pratiquement le même effet qu'un rideau d'arbres de même perméabilité.

Mais il faut remarquer qu'en général lorsque l'épaisseur d'un rideau d'arbres augmente, sa perméabilité diminue ; il en résulte que la protection exercée par une bande forestière est plus faible que celle d'un simple brise-vent (tabl. 1).

TABLEAU I

Effets comparés de brise-vent de différentes épaisseurs
(d'après NÄGELI 1953)

Nature du brise-vent	Largeur (m)	Vitesse moyenne du vent en % de celle de la zone ouverte, du côté sous le vent, sur les distances indiquées ci-dessous (multiples de *h*)						
		0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	0-10	0-20
Paroi de roseaux ..	0	52	37	56	74	52	44	55
Brise-vent	20	40	48	72	85	40	44	61
Bande forestière ..	600	55	75	83	89	55	65	86

D'autre part, CABORN (1956, 1957) a recherché en soufflerie la meilleure forme de profil transversal. Il a constaté qu'un profil incliné dans le sens du vent favorise le passage de celui-ci au-dessus de l'obstacle et que tout se passe comme si sa pénétrabilité avait été diminuée. Ainsi, un profil transversal de ce genre est à déconseiller et des rideaux protecteurs à section rectangulaire sont préférables.

1.2.5. — *Effet de la longueur du brise-vent sur son efficacité*

On a vu que lorsque le vent frappe normalement le brise-vent, il se forme deux zones de réduction de vitesse : l'une à l'avant du brise-vent, l'autre à l'arrière. Si l'on représente sur un plan horizontal les lignes d'égale réduction de vitesse, on constate qu'elles s'infléchissent à l'avant contre la paroi et tendent à devenir parallèles à celle-ci. L'effet protecteur maximal est atteint lorsque ce parallélisme est réalisé. NÄGELI (1953) a trouvé que pour arriver à ce résultat, il fallait que le rapport longueur sur hauteur soit au moins égal à 11,5. Au-delà de cette valeur, toute augmentation de longueur de l'abri augmente d'autant la longueur de la zone protégée.

Lorsque la direction du vent varie autour d'une direction principale, il faut augmenter la longueur de la barrière pour avoir une protection identique à celle obtenue sous un vent de direction constante.

1.2.6. — *Effets des variations de vitesse du vent sur l'efficacité du brise-vent*

Les rideaux protecteurs végétaux se déformant sous l'action du vent, il est possible que leur perméabilité varie.

Pour des rideaux de feuillus, une augmentation de la vitesse du vent peut se traduire par une augmentation de la perméabilité. En effet, les feuilles peuvent prendre une orientation offrant moins de résistance au passage du vent. C'est ainsi que VAN EIMERN (1956, 1957) a constaté qu'un rideau composé de trois rangs d'érables agit par vent faible comme un rideau imperméable et par vent fort comme un rideau semi-perméable (tabl. 2).

TABLEAU 2

Réduction moyenne de la vitesse du vent en pourcentage à 3 m de haut derrière un brise-vent composé de trois rangs d'érables de 12 m de haut, pour différentes vitesses de vent dans la zone ouverte (VAN EIMERN 1956, 1957)

Distances (multiples de *h*)	Vitesses en $m \cdot s^{-1}$ dans la zone ouverte				
	3,0-3,9	4,0-4,9	5,0-5,9	6,0-6,9	7,0-7,9
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1,3	62	60	63	72	76
4,0	36	38	46	52	53
8,0	47	48	48	46	50

Par contre, avec des rideaux de conifères, une augmentation de la vitesse du vent peut s'accompagner d'une diminution de la perméabilité car les branches se plaquent les unes contre les autres (BAUMGARTNER, 1961). Des mesures de la vitesse du vent faites au cours d'une période de 30 ans à partir de 1887 à l'abri de rideaux de sapins, ont montré, lorsque la couronne atteignit une hauteur suffisante, une réduction normale du vent de 30 p. 100 et jusqu'à 47 p. 100 au cours de fortes tempêtes (GEIGER, 1931).

Cependant, il est possible que l'augmentation de la vitesse du vent, sans changer la perméabilité d'un brise-vent, augmente l'effet protecteur. BODROV (1935) en donna l'explication : à l'abri du brise-vent il apparaît une turbulence qui a pour effet d'augmenter la vitesse verticale du vent au détriment de sa vitesse horizontale et, par conséquent, l'effet protecteur s'accroît.

1.2.7. — *Influence du profil thermique de l'air sur l'efficacité du brise-vent*

La réduction du vent peut également varier avec le gradient vertical de température (BALTAXE, 1961). Avec un gradient stable, le vent est plus réduit qu'avec un gradient instable. La présence d'un plafond d'inversion pendant la nuit peut limiter l'élévation de l'air et en obliger une plus grande partie à passer à travers le brise-vent. La protection est alors accrue.

Pendant le jour, le gradient est instable, l'air monte facilement et tout se passe comme si la perméabilité avait diminué. VAN EIMERN (1957) a trouvé qu'un rideau composé de deux rangées d'érables de 12 m de haut agit la nuit comme un brise-vent semi-perméable, tandis que le jour, la perméabilité semble diminuer.

Mais l'effet de la stabilité atmosphérique ne se manifeste pas aussi nettement dans toutes les régions et c'est ainsi que WOODRUFF, READ et CHEPIL (1959) trouvent que l'effet protecteur n'est pas modifié par la variation de la turbulence au cours de la journée.

1.2.8. — *Effets d'une série de brise-vent parallèles*

On peut penser que des brise-vent parallèles ont un effet cumulatif sur la vitesse du vent s'ils sont suffisamment rapprochés, un vent réduit étant chaque fois pris en charge par les brise-vent successifs. Mais en réalité, il semble que ce ne soit pas tout à fait le cas, comme le prouvent les expériences de JENSEN (1954), KAISER (1959), KARSCHON (1958), NÄGELI (1943, 1953), WOODRUFF (1956).

Si l'on implante, dans une plaine ouverte, un système constitué par quelques brise-vent parallèles, on constate que l'effet exercé sur la vitesse du vent n'est pas cumulatif et qu'il est même possible d'observer une diminution de l'effet protecteur derrière les premiers brise-vent.

D'autre part, si l'on considère un système plus étendu, on remarque que l'effet protecteur passe par une série de maximums et de minimums de façon plus ou moins périodique, l'amplitude de ces oscillations s'amortissant au fur et à mesure que l'on progresse à l'intérieur du système de brise-vent (KAISER, 1959). Par conséquent, l'effet protecteur maximum ne se manifeste qu'au-delà d'un certain nombre de rideaux (ALISSOW et *al.*, 1956).

On peut essayer de donner une explication à ce phénomène. Lorsqu'un flux d'air arrive normalement à un système de brise-vent parallèles, il existe un déséquilibre entre la vitesse du vent passant à travers le brise-vent et celle des couches

d'air passant immédiatement au-dessus. Au moment où cette différence de vitesse (ou de pression dynamique) atteint une certaine valeur, il se forme un tourbillon. Celui-ci a pour effet d'homogénéiser la répartition verticale des vitesses jusqu'à une certaine hauteur supérieure à celle du brise-vent et favoriser ainsi l'échange d'une partie de l'énergie cinétique entre la couche supérieure à grande vitesse et la couche inférieure à vitesse réduite. Une fois ce mélange opéré, plus rien n'entrave l'effet protecteur du brise-vent qui passe par un maximum.

Mais ensuite, la différence de vitesse entre les deux couches d'air envisagées s'accroît de nouveau. En effet, le flux inférieur passant dans les brise-vent successifs se trouve ralenti, tandis que le flux supérieur voit sa vitesse augmenter grâce à l'énergie cinétique qu'il emprunte par frottement aux couches qui le surmontent. Lorsque le déséquilibre atteint de nouveau sa valeur critique, on retrouve le tourbillon et les phénomènes l'accompagnant.

Aux oscillations de l'effet protecteur correspond chaque fois une perte d'énergie de l'ensemble du flux d'air et finalement un état d'équilibre s'établit lorsque la vitesse du vent passant au-dessus du brise-vent est réduite de telle façon qu'il ne peut plus se former de tourbillon.

Les échanges d'énergie successifs provoquent de proche en proche le ralentissement des couches plus élevées de l'atmosphère et si le système est assez étendu, ce ralentissement peut atteindre le vent géostrophique lui-même. A partir de là, même si le vent passe de nouveau sur une région de coefficient de rugosité moins élevé, il ne pourra pas reprendre sa vitesse initiale (JENSEN, 1954). Pour que ce phénomène soit observé, il faut que la distance parcourue par le vent dépendant du coefficient de rugosité de la région soit égale à 30 km selon JENSEN (1954) et 50 à 100 km selon KAISER.

Après avoir étudié les effets d'un système de brise-vent, il faut maintenant essayer de préciser l'espacement optimal des rideaux.

NÄGELI (1957) pense qu'il doit être au minimum de 20 fois la hauteur du brise-vent, car un espacement trop faible augmente la turbulence et diminue d'autant l'efficacité du système (1958).

Les expériences de KARSCHON (1958) en Israël confirmeraient ces théories. Avec une série de trois rideaux protecteurs constitués de *Pennisetum purpureum* SCHUM (herbe à éléphant), séparés par des distances de 7,5 fois leur hauteur, il a constaté sur l'ensemble de deux parcelles protégées une réduction moyenne du vent de 65 p. 100. Cependant, la suppression de la haie médiane ne réduisait l'effet protecteur qu'à 53 p. 100 ce qui prouve que le fait de doubler l'espacement entre les brise-vent n'a eu qu'une faible influence.

II. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE MICROCLIMAT

2.1. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION

2.1.1. — *Influence sur l'évapotranspiration potentielle*

2.1.1.1. — *Considérations théoriques.*

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la perte d'eau totale en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant, en pleine croissance, très largement alimenté en eau.

Elle représente l'évapotranspiration maximale sous un climat donné et dépend des effets combinés :

— du bilan radiatif,
— du vent,
— de la température,
— de l'humidité de l'air.

On sait que ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres (BOUCHET 1963). L'implantation d'un brise-vent va non seulement contribuer à les faire varier mais également changer les relations qui existent entre ceux-ci. On doit donc s'attendre à des modifications importantes de l'évapotranspiration potentielle.

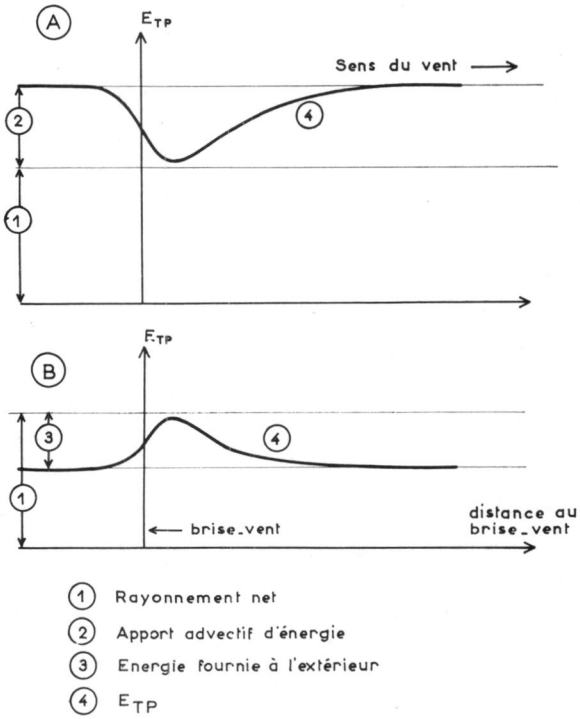


FIG. 5. — *Schéma indiquant l'influence d'un brise-vent sur ETP*
A — La région reçoit des apports advectifs positifs d'énergie ;
B — La région fournit de l'énergie à l'extérieur.

De nombreuses études ont été entreprises pour déterminer l'influence des brise-vent sur ETP ou plutôt sur une grandeur qui lui est sensiblement proportionnelle : l'évaporation physique d'une nappe d'eau libre (JAWORSKI, 1961 ; TAMATE, 1956). Ce problème préoccupe d'ailleurs les chercheurs depuis longtemps : LA COUR (1872) avait déjà constaté que l'évaporation diminuait nettement, par rapport à une zone non protégée, sur une faible distance, du côté « au vent » et sur une plus grande étendue du côté « sous le vent ».

En général, l'effet d'un brise-vent se traduit par une diminution de ETP Quelle explication en donner ? Dans la plupart des cas où l'on envisage de les utiliser,

l'évapotranspiration réelle ETR est inférieure à ETP. Dans de telles régions, ETR exprimée en énergie correspond à peu près au rayonnement net ; l'énergie rendue disponible par le manque relatif d'eau contribue à élever la température et à augmenter ainsi le pouvoir desséchant de l'air. Il en résulte que ETP peut s'exprimer, comme dans la formule de PENMAN, d'une part en fonction du rayonnement net, c'est-à-dire de ETR et d'autre part, du pouvoir desséchant de l'air traduit dans la formule par le terme E*a*, évaporation d'une surface d'eau libre maintenue à la température de l'air. Par ailleurs, BOUCHET en partant de cette formule a relié, pour un climat donné, ETP à E*a*. Or E*a* est une fonction directe de la vitesse du vent. On conçoit dans ces conditions que la réduction de la vitesse du vent, en diminuant la valeur de E*a*, traduise une réduction parallèle de ETP.

2.1.1.2. *Résultats expérimentaux.*

Cette explication théorique est confirmée par tous les résultats expérimentaux. La forme des courbes de réduction de ETP ou de l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre est donnée figure 5 A. L'examen de ces courbes expérimentales

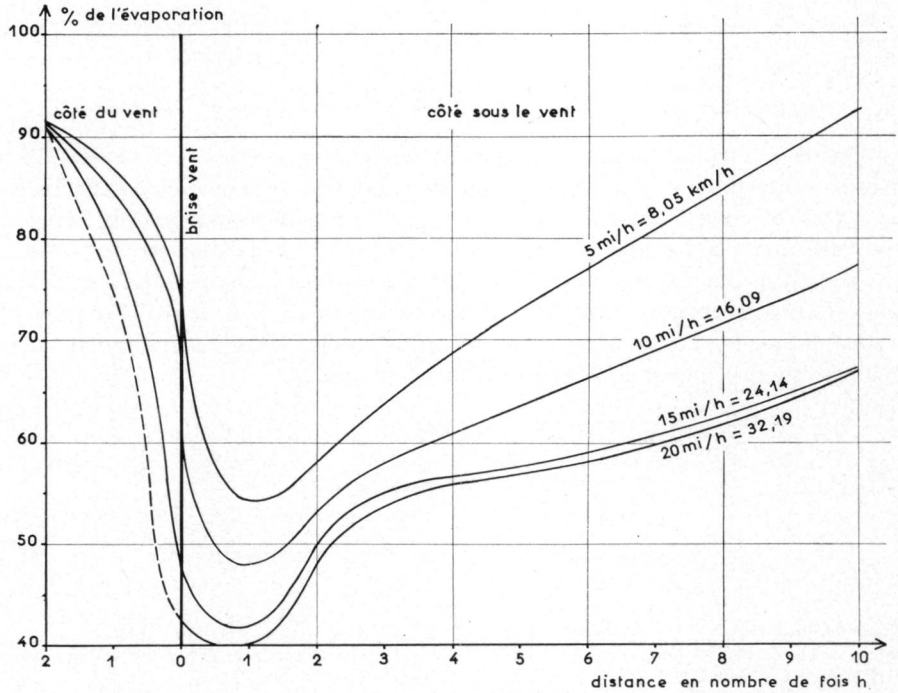


FIG. 6. — *Influence d'un brise-vent sur l'évaporation suivant la vitesse du vent libre* (d'après BATES)

montre que si tous les auteurs constatent bien que la position du minimum d'évaporation ne coïncide pas avec celle du minimum de vitesse, par contre, sa position par rapport au brise-vent apparaît assez variable.

En fait, la position du minimum d'évaporation dépend de la vitesse du vent et de la perméabilité du brise-vent d'une part, de la nature de celui-ci d'autre part.

Lorsque le brise-vent est inerte ou lorsque la masse de feuillage est peu importante, le minimum d'évaporation est situé du côté « sous le vent » (fig. 6) et il peut s'éloigner lorsque la vitesse du vent augmente (BATES, 1911). Mais lorsque le rideau protecteur présente une certaine épaisseur, le minimum d'évaporation est alors situé à l'intérieur du rideau même (fig. 7) (MIASNICOV et *al.*, 1958, NÄGELI, 1943).

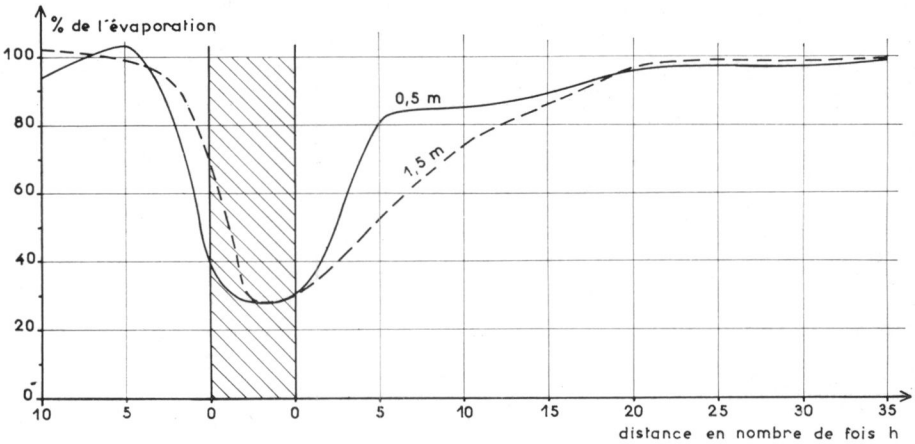


FIG. 7. — *Influence d'un brise-vent sur l'évaporation mesurée à l'aide de boîtes de Pétri remplies d'eau et placées à* 0,50 *m et* 1,50 *m du sol* (d'après MIASNICOV, PLESA, STEFAN)

Quant à l'étendue de la zone de réduction de l'évaporation, elle dépend du type de brise-vent employé et c'est ainsi que des mesures que nous avons effectuées au cours de l'été 1962 (travaux non publiés) ont permis de constater que l'effet d'un brise-vent inerte ayant une perméabilité de 50 p. 100 se fait encore sentir du côté sous le vent à une distance au moins égale à 20 fois sa hauteur, tandis que dans le cas de barrières denses, l'intense brassage turbulent de l'air limite l'extension de la zone protégée (BLENK et *al.* 1956 ; BODKOV, 1935). Des résultats analogues ont déjà été obtenus comme le montre le tableau suivant :

TABLEAU 3

Mesures de l'évaporation en soufflerie (évaporation en grammes par 100 *minutes)*
(BLENK et TRIENES, 1956)

	Côté au vent			Côté sous le vent									
Distances (multiples de *h*)	— 10	— 6	— 2	+ 2	+ 6	+ 10	+ 14	+ 18	+ 22	+ 26	+ 30	+ 34	+ 38
Évaporation sans barrière	6,3	5,8	5,9	5,7	5,6	5,6	5,5	5,4	5,2	5,2	5,2	5,1	5,2
Paroi dense	6,2	6,2	6,5	5,5	*6,8*	*8,1*	*8,2*	*7,7*	*7,0*	*6,7*	*6,6*	*6,3*	*6,3*
Haie perméable (50 % de vides)	6,0	5,9	5,5	5,0	3,5	3,0	3,7	4,7	5,1	5,9	5,3	5,1	5,3

Les auteurs soviétiques se sont beaucoup intéressés à ce problème de la réduction de l'évaporation dans les zones protégées et c'est ainsi que LEVIN (1953) trouve que les bandes forestières diminuent l'évaporation sur jachère d'un tiers par rapport

à la steppe ouverte et que l'évaporation des sols avec blé d'hiver dans les zones protégées est deux fois inférieure à celle de la steppe ouverte. De même KUSENKO (1953) affirme que les pertes en eau du sol par évaporation sont réduites de 20 p. 100 à l'abri de bandes forestières.

JENSEN (1954), de son côté, a étudié en soufflerie l'effet du vent et du déficit de saturation sur la transpiration végétale. Il a été conduit à formuler une loi expérimentale du type de la formule de DALTON permettant de déterminer l'étendue de la zone protégée à partir de la réduction du vent. Mais comme on le verra plus loin, l'effet du vent sur la transpiration végétale est beaucoup plus complexe car il faut tenir compte de toute une série de facteurs qui interfèrent.

Toutes les expériences qui viennent d'être relatées ne concernent que des phénomènes variant dans le même sens que ETP car en fait très peu d'auteurs ont étudié réellement le problème dans son ensemble. On peut cependant citer ASLYNG (1955), STAPLE et LEHANE (1958) qui, à partir de la mesure de l'évaporation et en appliquant la formule de PENMAN, ont pu calculer l'influence d'un brise-vent sur ETP. C'est ainsi qu'ASLYNG constate une réduction de ETP par rapport à celle mesurée dans un poste météorologique placé en dehors de la zone d'action d'une barrière en bois orientée nord-sud, de 2,50 m de haut et ayant 45 p. 100 de vides. Les mesures étaient effectuées en trois points : 10 m à l'ouest de la barrière (dans la zone au vent), 10 et 20 m à l'est (dans la zone sous le vent) (tableau 4).

TABLEAU 4

	Réduction du vent (en %) et de ETP (en mm)					
	10 m à l'ouest		10 m à l'est		20 m à l'est	
	Vent	ETP	Vent	ETP	Vent	ETP
1955 (2-5/10-10).....	11	8	13	4	35	34
1956 (2-4/17-9).....	17	39	23	45	44	81

L'été 1955 fut relativement chaud et l'été 1956 relativement froid. ASLYNG constate que c'est en 1956 que la réduction de l'évapotranspiration potentielle a été la plus importante.

Cependant, dans certaines conditions, il faut remarquer que les brise-vent ne réduisent pas toujours ETP et l'on peut assister à une augmentation de celle-ci (fig. 5 B). C'est le cas où la région joue le rôle de source chaude par rapport au voisinage. Si pour une raison quelconque ETR est inférieure dans une région limite à ce qu'elle pourrait être en fonction des facteurs énergétiques, on aura des pertes latérales de chaleur vers les régions voisines. L'implantation d'un brise-vent contribuera à réduire ces pertes d'énergie et par contrecoup augmentera ETP. Ce phénomène peut se rencontrer dans une région relativement sèche mais également à l'échelle d'un domaine agricole. Un sol nu peut jouer le rôle de source chaude tandis qu'une culture voisine jouera le rôle de source froide.

2.1.2. — *Influence des brise-vent sur l'évapotranspiration réelle (ETR)*

Interprétations théoriques

Si le problème de l'influence des brise-vent sur l'évapotranspiration potentielle a été plus ou moins abordé, il n'en est pas de même de celui de l'évapotranspiration réelle (ETR) ; celle-ci correspond à la perte d'eau totale en phase gazeuse d'un couvert végétal dans les conditions naturelles. Elle est, par définition, inférieure ou au plus égale à ETP.

L'étude de l'influence d'un brise-vent sur ETR est d'un grand intérêt car cette dernière est liée aux réactions physiologiques des végétaux devant le facteur eau.

Avant d'étudier l'influence d'un brise-vent sur ETR, il faut essayer de comprendre comment celle-ci varie en fonction de ETP au cours de la journée. Pour cela il est nécessaire d'émettre un certain nombre d'hypothèses de travail qui, s'appuyant sur des données théoriques et des faits bien établis, permettent de concilier de nombreux résultats expérimentaux apparemment contradictoires.

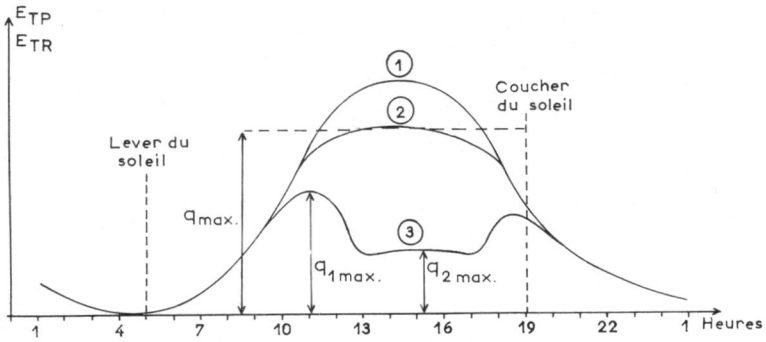


FIG. 8. — *Représentation schématique de la variation journalière de ETP* (1) *et ETR* (2, 3)

On peut représenter schématiquement la variation journalière de ETP par la courbe (1) de la figure 8 (BOUCHET 1962, 1963). Celle-ci représente la quantité d'eau maximale évaporable au cours de la journée. On supposera en outre que la plante peut assurer à un instant donné un débit q maximal fonction de sa nature, de son état physiologique, de l'humidité du sol et de ses caractéristiques hydrodynamiques (potentiel capillaire), du volume de terre exploré par les racines fonctionnelles, de l'accroissement de ce volume (VERNET et CHAUSSAT, 1961) et comme l'a montré récemment HALLAIRE, de la vitesse de desséchement du sol (HALL, RUSSELL, HAMILTON 1958 ; HALLAIRE 1962, 1963). Si les plantes sont dans des conditions telles que ce débit q max. est supérieur à tout instant à ETP, ETR demeure alors égale à ETP.

Mais en réalité, ces conditions idéales se rencontrent rarement. Par exemple, au cours de l'été 1960, on a observé que la fermeture des stomates de luzernes, situées sur des évapotranspiromètres, se produisait lorsque les ETP quotidiennes dépassaient une valeur de l'ordre de 5 mm/jour (BOUCHET 1961 ; de PARCEVAUX, 1961).

Il faut donc essayer de suivre les réactions des végétaux lorsque ETP est

supérieure au débit q max. Dans ce cas, la plante ferme plus ou moins ses stomates par où s'effectuent principalement les échanges de vapeur d'eau, D'après STOCKER (1956) on peut distinguer schématiquement deux types de régulation stomatique selon le climat considéré.

Dans les régions subhumides, l'écart entre q max. et ETP max. est faible. Aux heures les plus chaudes, la régulation stomatique permet à la plante de limiter ses pertes en eau au débit q max. Mais on n'arrive généralement pas à la fermeture totale des stomates, ni au flétrissement. Ainsi, on peut représenter la variation journalière d'ETR par une courbe telle que la courbe 2 de la figure 8. On voit que ETR est égale à ETP tant que ETP instantanée demeure inférieure à q max. Par contre, aux heures les plus chaudes, ETR « décroche » et passe par un maximum très aplati correspondant à q max. Les études entreprises par de PARCEVAUX (1961) semblent confirmer cette première hypothèse.

Lorsque les conditions d'alimentation en eau deviennent plus difficiles ou bien lorsque ETP atteint des valeurs plus grandes, les stomates se ferment complètement et, avec un retard variable selon les conditions, les plantes flétrissent. Ce cas est représenté par la courbe 3 de la figure 8 (1). Il semble que la plante doive fournir un débit $q_1$max. pour que les stomates se ferment. A partir de ce moment, les pertes d'eau sont dues uniquement à la transpiration cuticulaire. La plante ne fournit plus alors que le débit q_2 inférieur à $q_1$max. En fin de journée, ETP étant redevenue voisine de $q_1$max., les tissus végétaux reprennent leur turgescence et les stomates s'ouvrent à nouveau.

Des mesures du taux de la transpiration sur orangers à Tunis en juillet 1961 semblent avoir mis en évidence ce phénomène. De plus, les fluctuations du rapport transpiration/évaporation constatées par de PARCEVAUX (1962) pour un végétal donné, peuvent s'expliquer par l'écart existant entre $q_1$max. et q_2.

A partir de ces hypothèses, il est possible maintenant d'analyser les effets exercés par un brise-vent sur ETR.

On a vu qu'un brise-vent produit une augmentation ou une diminution de ETP selon le régime thermique de la région. Aussi est-il nécessaire d'envisager séparément les deux cas. On examinera tout d'abord celui où la région considérée est incluse dans une zone relativement plus sèche (cultures au milieu de savanes ou de jachères) susceptible de lui fournir de l'énergie complémentaire par advection.

Dans le cas des régions humides ou subhumides, la plupart des expérimentateurs ont constaté que les brise-vent réduisent en général ETR. La fig. 9A représente schématiquement ce cas. La partie gauche indique la variation journalière de ETP et de ETR en zone ouverte, la partie droite, la variation de ETP et de ETR en fonction de la distance au brise-vent, au moment où ETP est maximale. A cet instant, ETR en zone ouverte est égale au débit q max. Si le brise-vent dans son voisinage réduit suffisamment ETP, pour qu'elle devienne inférieure à q max., il diminue également ETR.

Un tel phénomène peut s'observer dans la région parisienne. Au cours de l'été 1962, nous avons constaté que dans un champ de betteraves où se trouvait un brise-

(1) En réalité les courbes 2 et 3 de la figure 8 correspondent à des conditions climatiques différentes Il s'agit d'un schéma et non d'une représentation à l'échelle.

vent semi-perméable, les feuilles se flétrissaient beaucoup plus tôt dans la zone ouverte que dans la zone protégée.

La figure 9 B représente le cas où l'alimentation des plantes en eau est plus difficile et où les végétaux se flétrissent pendant une partie de la journée. La partie droite de la figure qui correspond au moment où ETP est maximale, permet de constater que le brise-vent peut augmenter ETR. En effet, si l'on réduit ETP à une

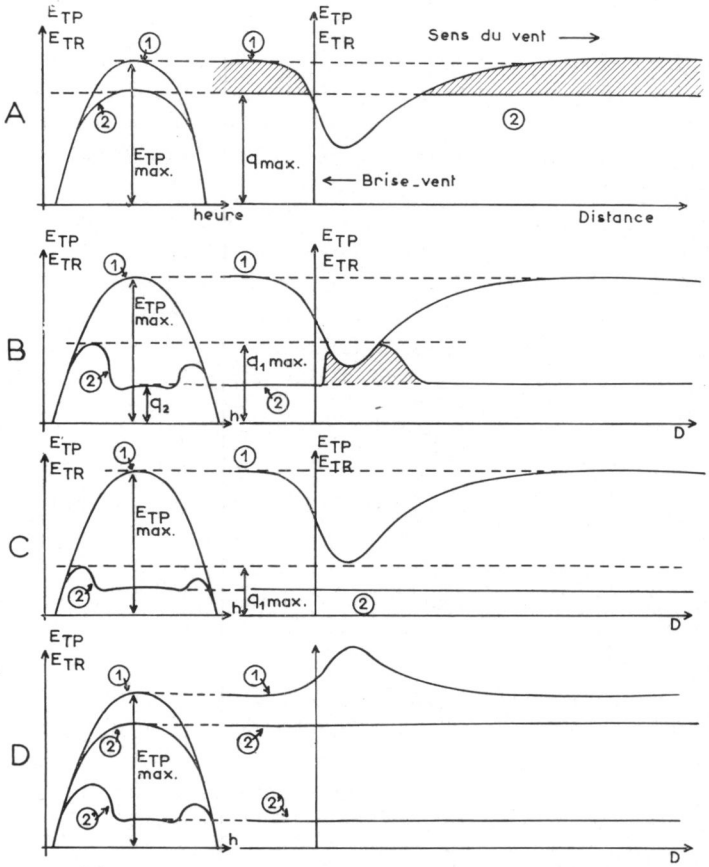


FIG. 9. — *Schéma indiquant la variation de ETR dans différentes conditions climatiques*

La partie gauche représente la variation journalière de ETP et ETR. La partie droite indique la variation de ETP et de ETR en fonction de la distance au brise-vent au moment où ETP est maximale
(1) ETP (2) ETR

valeur inférieure à q_1 max., les plantes ne se flétrissent pas et elles perdent une quantité d'eau supérieure au débit q_2 qui correspond à un degré avancé de plasmolyse.

De plus, comme on le verra plus loin, les travaux de NICOTA (1961) et de STAPLE et LEHANE (1955) (figure 18) montrent bien que les brise-vent peuvent augmenter la quantité d'eau consommée.

Enfin, en conditions très arides, les plantes sont flétries dans la zone protégée et dans la zone ouverte (figure 9 C). Dans ce cas, un brise-vent n'a que peu d'influence sur ETR.

Ainsi, dans une région où ETP dépend des apports advectifs positifs d'énergie, un brise-vent peut diminuer ou augmenter ETR. Cependant il faut noter que, pour simplifier le schéma, on a négligé les variations du débit q max. en fonction du pouvoir évaporant de l'air. En effet, HALLAIRE (1961, 1962, 1963) a montré que le débit susceptible d'être fourni par les plantes dépend de la vitesse de dessèche-. ment du sol et augmente lorsque la demande d'eau caractérisée par ETP diminue. Ce phénomène peut donc contribuer à accroître la quantité d'eau consommée dans la zone protégée.

Ayant examiné le cas où les brise-vent diminuent ETP, étudions maintenant celui où ils l'augmentent.

Sur la figure 9 D, on a groupé les effets d'un brise-vent dans les différentes conditions climatiques envisagées précédemment (A et B). Si ETP demeure inférieure à q max. (conditions très humides), un brise-vent augmente ETR, mais dans le cas où la régulation stomatique intervient (q max. $<$ ETP) le brise-vent n'a normalement pas d'effet sur ETR. L'écart ETP-ETR augmente au préjudice de la plante. Ainsi, à l'opposé de ce que l'on a vu plus haut, l'accroissement de ETP peut s'accompagner d'une diminution de q max. Dans ces conditions on peut concevoir que dans la zone protégée ETR puisse diminuer et que les plantes flétrissent alors qu'elles resteraient turgescentes dans la zone ouverte.

On vient d'étudier l'effet d'un brise-vent sur ETR à un instant donné, mais il est bien évident que ETP variant au cours de la journée, cet effet va évoluer au cours du temps. Par exemple, on pourra constater que le brise-vent réduit ETR en début de matinée ; puis, ETP augmentant, il peut avoir une action inverse dans l'après-midi. Le problème de l'influence d'un brise-vent sur la consommation de l'eau est donc extrêmement complexe.

De plus, les réactions des végétaux varient selon les espèces et même les variétés ce qui augmente encore la diversité des cas rencontrés.

2.2 — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LA TEMPÉRATURE DE L'AIR. ÉTUDE ANALYTIQUE ET INTERPRÉTATIONS

2.2.1. — *Influence d'un brise-vent sur le régime thermique diurne de la zone protégée*

Les premières mesures de température derrière un brise-vent remontent à LA COUR (1872). Depuis cette date, le problème a préoccupé un grand nombre de chercheurs. Pourtant, là encore, les résultats obtenus paraissent également contradictoires : pour les uns, les brise-vent produisent une augmentation de la température de l'air et, pour les autres, un abaissement. Nous allons tenter, en utilisant les considérations théoriques avancées précédemment pour ETP et ETR, de lever ces contradictions.

La température de l'air situé dans la zone protégée par un brise-vent dépend essentiellement de deux facteurs :

1°) Le ralentissement du vent qui permet l'élévation de la température des couches basses ;

2°) L'évapotranspiration réelle qui, selon les cas, peut agir dans le même sens que le ralentissement du vent ou avoir un effet opposé.

Suivant les conditions climatiques d'une région, un brise-vent peut donc augmenter ou diminuer la température de l'air de la zone protégée par rapport à une zone ouverte.

Dans les climats humides où ETR est très voisine de ETP, l'énergie apportée par le rayonnement et par le vent est susceptible d'être utilisée pour l'évaporation de l'eau. Le principal facteur agissant sur la température de l'air est donc le ralentissement du vent. Dans ces conditions l'air est plus chaud dans la zone protégée que dans la zone ouverte. Ce fait semble pleinement confirmé par les résultats des expériences d'ASLYNG (Suède, 1958), JENSEN (Danemark, 1954), VAN DER LINDE (1954) et VAN RHEE (Hollande 1957-1959-1961,), VANHELMONT (Belgique, 1955), qui ont tous opéré dans des régions nordiques à climat de type océanique.

Dans le cas (correspondant à la figure 9 A) où le brise-vent réduit à la fois ETP et ETR, ce qui correspond à des conditions légèrement moins humides, la régulation stomatique intervient et, pendant une partie de la journée, ETR est inférieure à ETP. Une certaine quantité d'énergie n'est pas utilisée pour l'évaporation de l'eau et contribue à élever la température de l'air. Cette énergie non utilisée est indiquée par la partie hachurée. On peut s'attendre d'après ce schéma, à observer des températures plus basses dans la zone protégée que dans la zone ouverte. Mais ce phénomène peut être plus ou moins compensé par le ralentissement du vent, ralentissement qui favorise l'élévation de la température de l'air dans la région proche du brise-vent. Selon les conditions expérimentales, vitesse du vent, importance de l'apport extérieur d'énergie, valeur relative de q max., perméabilité du brise-vent, on doit observer dans la zone protégée une diminution ou une augmentation de la température de l'air.

On peut ainsi expliquer la diversité des résultats obtenus dans les régions subhumides. BOUCHET [1] par exemple, a enregistré dans la région parisienne, des températures plus basses en zone protégée qu'en zone ouverte ; BURNACKIJ et ROZHANSKAJA (1953) ont également noté le même phénomène en Russie (tableau 5) ; mais par contre, JAWORSKI (1961), en Pologne, signale que les brise-vent augmentent la température de l'air.

TABLEAU 5

Effet modérateur des brise-vent sur la température de l'air des zones protégées
(d'après BURNACKIJ et ROZHANSKAJA, 1953)

Période	Jachère						Blé					
	Steppe			Zone protégée			Steppe			Zone protégée		
	t. max	t. min	t. moy	t. max	t. min	t. moy	t. max	t. min	t. moy	t. max	t. min	t. moy
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
du 15-5 au 16-7 1948	26,2	16,0	21,0	25,4	15,9	20,7	25,5	15,3	20,0	24,6	15,3	19,8
du 17-5 au 13-8 1949	26,4	14,4	20,4	26,3	14,9	20,5	25,9	14,3	19,9	25,6	13,9	19,8

[1] Article de BOUCHET et de PARCEVAUX 1963.

Dans les climats encore plus secs, les plantes se flétrissent durant une partie de la journée et l'on a vu qu'un brise-vent accroît la consommation d'eau dans la zone protégée. Ce cas est schématisé par la figure 9 B. L'énergie utilisée par l'évaporation de l'eau étant plus importante dans la zone protégée que dans la zone ouverte, on peut s'attendre à observer des températures plus basses en zone protégée. Il semble qu'en général ce premier facteur l'emporte sur l'effet du ralentissement du vent. C'est ainsi que NICOTA (1961) constate qu'un brise-vent établi dans une région aride de Yougoslavie a pour effet de diminuer la température de l'air (CHAMPION 1958) (tableau 6). Ces résultats sont confirmés par les travaux de HALL, RUSSELL et HAMILTON en Australie (1958).

TABLEAU 6

Température moyenne de l'air à 50 cm du sol, mesurée du 20 au 24 juin 1955

Le brise-vent a 6 m de large et 3,80 m de haut. Il est orienté NE-SW. Pendant les mesures, le vent soufflait du secteur nord. Le signe + représente une augmentation et le signe — une diminution de la température de l'air (NICOTA, 1956).

Points d'observation	Températures moyennes aux heures :								
	7	8	10	11	12	13	14	16	18
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
A l'abri du rideau à 5 m	27,0	29,9	32,6	34,0	35,9	36,1	35,2	31,6	37,8
Au découvert	26,6	29,3	32,6	34,0	35,8	36,2	35,7	34,4	30,2
± T°C	+ 0,4	+ 0,6	0,0	0,0	+ 0,1	— 0,1	— 0,5	— 2,8	— 2,4
A l'abri du rideau à 20 m	26,0	28,7	31,0	32,8	34,1	35,3	34,0	32,9	29,5
Au découvert	26,6	29,3	32,6	34,0	35,8	36,2	35,7	34,4	30,2
± T°C	— 0,6	— 0,6	— 1,6	— 1,2	— 1,7	— 0,9	— 1,7	— 1,5	— 0,7
A l'abri du rideau à 80 m	25,7	28,1	30,7	32,2	33,8	34,0	33,7	32,5	29,2
Au découvert	26,6	29,3	32,6	34,0	35,8	36,2	35,7	34,4	30,2
± T°C	— 0,9	— 1,2	— 1,9	— 1,8	— 2,0	— 2,2	— 2,0	— 1,9	— 1,0
Sous couvert du rideau, au centre	25,3	27,4	30,5	31,1	32,0	32,8	31,3	31,0	28,7
Au découvert	26,6	29,3	32,6	34,0	35,8	36,2	35,7	34,4	30,2
± T°C	— 1,3	— 1,9	— 2,1	— 2,9	— 3,8	— 3,4	— 4,4	— 3,4	— 1,5
Devant le rideau à 5 m	28,2	30,0	34,2	34,8	37,0	37,4	36,4	35,0	30,7
Au découvert	26,6	29,3	32,6	34,0	35,8	36,2	35,7	34,4	30,2
± T°C	+ 1,6	+ 0,7	+1,6	+ 0,8	+ 1,2	+ 1,2	+ 0,7	+ 0,6	+ 0,5

Enfin, dans les régions très arides, on a vu qu'un brise-vent a très peu d'effet sur ETR (fig. 9 C) et le seul facteur agissant sur la température de l'air est le ralentissement du vent. Dans ces conditions, l'implantation d'un brise-vent produit une élévation de la température.

On vient d'étudier, dans le cas où la région reçoit des apports advectifs positifs

d'énergie, l'influence générale d'un brise-vent sur la température de l'air en fonction des conditions climatiques, mais on peut également dans une région donnée étudier la variation de l'effet d'un brise-vent au cours de la journée ou au cours de l'année.

Au cours de la journée en effet ETP et ETR évoluent : si ETR est égale à ETP en début de matinée, la température de l'air est alors plus grande dans la zone protégée, puis ETP augmentant, il est possible que l'effet du brise-vent s'inverse.

Au cours de l'année le même phénomène peut se rencontrer. Par exemple, dans les climats méditerranéens, ETR est très voisine de ETP pendant la saison froide, tandis qu'en été ETR est très faible. Il est donc logique de penser que dans ces régions, l'effet d'un brise-vent diffère selon la saison. C'est ainsi que, derrière des rideaux d'eucalyptus, GIULIANI et SAVI (1951) en Sardaigne, ont trouvé des températures plus élevées en hiver et au printemps et sensiblement plus basses en été et en automne, que dans une zone ouverte.

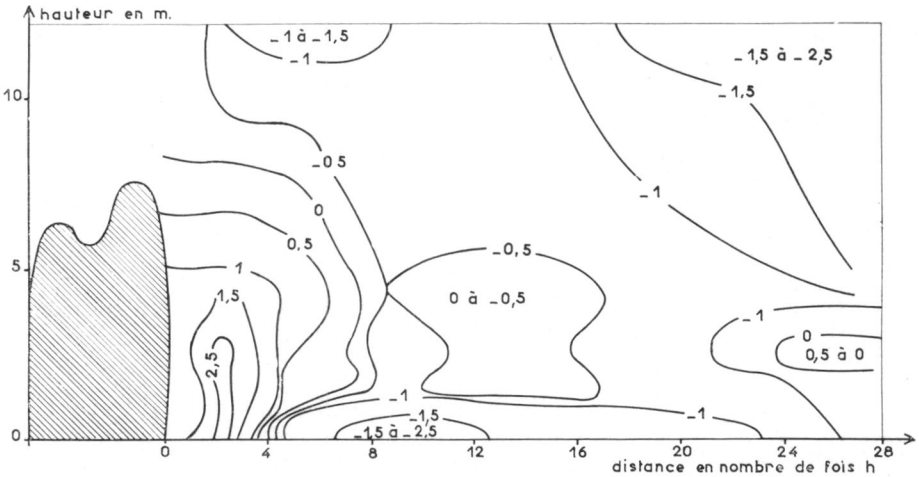


FIG. 10. — *Différences de température entre la partie abritée par un brise-vent et la plaine ouverte, à midi* (d'après WOODRUFF, READ et CHEPIL)

Il reste maintenant à étudier le cas où la région fournit de l'énergie à l'extérieur. Il est aisé de voir que, quel que soit l'effet d'un brise-vent sur ETR (fig. 9 D), la température de l'air est normalement plus élevée dans la zone protégée que dans la zone ouverte.

Cependant, il est possible que l'implantation d'un brise-vent dans une telle région crée des hétérogénéités de température qui, localement, se traduisent par une diminution de celle-ci relativement à la zone ouverte. En effet, dans les régions chaudes, le gradient vertical de température est tel que l'atmosphère au voisinage du sol est instable. L'implantation d'un brise-vent, produisant une élévation de température, augmente l'instabilité atmosphérique. Ainsi, un régime autoconvectif peut s'établir au sein de la zone protégée : l'air chaud s'élève dans la région très proche du brise-vent où l'accroissement de température est le plus grand et l'air froid redescend à une plus grande distance. Ce phénomène a été constaté par WOODRUFF READ et CHEPIL (1959) qui ont effectué des mesures en été sur un chaume protégé par un brise-vent, au Kansas (fig. 10).

D'autre part, il faut noter que l'effet d'un brise-vent sur la température dépend des conditions météorologiques. Lors de l'advection de masses d'air froid, la région joue le rôle de « source chaude » et un brise-vent provoque une élévation relative de la température; tandis que, lors de l'advection de masses d'air chaud, l'inverse se produit. Ce phénomène a été étudié par NICOTA (1961) en Yougoslavie (tableau 7).

TABLEAU 7

Type de masses d'air	Structure du brise-vent	En avant du rideau en m		Dans le rideau	A l'abri du rideau en m					
		40	5	0	5	20	40	60	80	100
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Froid	perméable	25,8	26,3	24,6	27,1	26,6	26,3	26,1	26,1	—
		0,0	+ 0,5	— 1,2	+ 1,3	+ 0,8	+ 0,5	+ 0,3	+ 0,3	—
Froid	imperméable	23,0	23,4	22,1	23,6	23,9	23,4	23,2	—	23,1
		0,0	+ 0,4	— 0,9	+ 0,6	+ 0,9	+ 0,4	+ 0,2	—	+ 0,1
Chaud	perméable	30,6	30,6	28,1	30,1	29,9	29,9	30,1	30,1	—
		0,0	0,0	— 2,5	— 0,5	— 0,7	— 0,7	— 0,5	— 0,5	—
Chaud	imperméable	28,5	28,5	26,3	28,3	28,1	28,1	28,3	—	28,4
		0,0	0,0	— 2,2	— 0,2	— 0,4	— 0,4	— 0,2	—	— 0,1

En examinant ce tableau, on constate d'autre part qu'un brise-vent semi-perméable a un effet beaucoup plus marqué sur la température qu'un brise-vent dense.

On notera également que si un brise-vent n'a pas toujours un effet sensible sur la température moyenne de l'air, par contre son effet peut se manifester par un écrêtement des maximums (VANHELMONT, 1955) (tableau 6). Ce phénomène s'explique très bien à partir de l'interprétation que nous avons donnée de l'influence des brise-vent sur les relations entre ETP et ETR. Cet écrêtement des températures et de ETP contribue à placer les végétaux dans les meilleures conditions de production.

Pour terminer cette étude de l'influence des brise-vent sur la température de l'air, on indiquera quelques faits qui peuvent jouer un rôle important dans certains cas particuliers.

Par exemple, l'ombrage porté par un brise-vent peut avoir une influence différente sur la température selon l'orientation des rideaux, leur espacement, l'heure et la saison. Cet effet n'intéresse en réalité qu'une bande de faible largeur mais le problème est à envisager lorsque les brise-vent sont très rapprochés, comme dans le midi de la France.

Il faut noter également qu'un brise-vent réfléchit en partie les radiations qu'il reçoit sur sa face au soleil et qu'il peut en résulter un échauffement sur une bande étroite de terrain, échauffement qui contribue à élever localement la température de l'air.

2.2.2. — *Influence d'un brise-vent sur le régime thermique nocturne de la zone protégée*

Le refroidissement nocturne dépend essentiellement de trois facteurs :

— Le vent ;

— Les phénomènes de condensation (ou de congélation);

— Le rayonnement net.

Le ralentissement du vent par un rideau protecteur tend à provoquer un refroidissement plus rapide de l'air. Cet abaissement de température est d'autant plus important que le vent est plus réduit. Avec des brise-vent imperméables, il a été observé des écarts de température entre zone protégée et zone ouverte pouvant atteindre plusieurs degrés au cours de nuits de fort rayonnement. Dans ces conditions, les risques de gelées printanières sont notablement accrus. Mais le danger est moindre avec des brise-vent semi-perméables qui n'arrêtent pas complètement le vent.

Cependant, le refroidissement nocturne peut être freiné par le dépôt de la rosée. Or, comme on le verra plus loin, l'humidité absolue de l'air est plus grande dans une zone protégée que dans une zone ouverte ; aussi le point de rosée est atteint plus tôt. On explique ainsi un fait signalé par plusieurs auteurs : il existe dans la zone protégée par un brise-vent une couche d'air voisine du sol dont l'épaisseur ne dépasse pas 50 cm, où la température est égale et même légèrement supérieure à celle de l'air au-dessus de la zone ouverte (KAISER, 1960 ; TREGUBOV, 1960).

Enfin, il faut rappeler que le rayonnement émis par le brise-vent contribue à limiter les pertes par rayonnement net et à freiner ainsi le refroidissement dans sa proximité immédiate (STEUBING, 1952-1953).

2.2.3. — *Influence d'une couverture nuageuse sur le régime thermique de la zone protégée*

Lorsque le ciel est couvert, les différences de température entre zone protégée et zone ouverte sont très faibles (quelques dixièmes de degré au maximum (NICOTA, 1961).

En effet, ETP est alors fortement réduite et l'écart ETP-ETR est faible. On a vu que, dans ces conditions, un brise-vent produit une élévation de température. Mais le rayonnement solaire direct étant intercepté, ce réchauffement reste peu important.

2.2.4. — *Influence du boisement sur le régime thermique d'un pays*

L'implantation de rideaux d'arbres augmente ETR à l'échelle d'une région. En effet, les arbres utilisent les réserves en eau de couches profondes que ne peuvent pas atteindre les autres végétaux. Dès lors, le débit q max. est plus élevé et ceci sur une période de végétation plus longue. Ainsi l'évapotranspiration réelle de la région est plus grande et l'énergie disponible pour élever la température de l'air plus faible. On peut donc s'attendre à ce que la température moyenne annuelle s'abaisse. Inversement, la suppression des forêts doit s'accompagner d'une augmentation de la température. C'est ainsi que SOZYKINE (1948) constate, à la suite de la déforestation de 40 millions d'hectares opérée au cours du siècle dernier sur le territoire de la Russie d'Europe, une élévation de 1° de la température moyenne annuelle.

BERG (1941) donne à ce sujet les chiffres qui sont présentés dans le tableau 8. Le plus fort réchauffement s'observe à Kazan et correspond à la région où les déboisements effectués sont les plus importants.

TABLEAU 8

Élévation de la température moyenne annuelle dans les régions ayant été déboisées

Lieux d'observation	Périodes	Augmentation en °C de la température moyenne annuelle
Léningrad	1801 à 1936	1,1
Kazan	1828 à 1934	1,6
Sverdlovsk	1834 à 1923	1,0
Moscou	1854 à 1908	0,8

2.3. — Influence des brise-vent sur l'humidité de l'air

L'humidité absolue de l'air dépend de deux facteurs :

— La production de vapeur d'eau (ETR);

— Son évacuation par le vent.

Un brise-vent diminue la vitesse du vent et permet ainsi de conserver la vapeur d'eau dans la zone protégée. Mais d'autre part, selon les conditions climatiques, il diminue ou augmente ETR. Il peut donc avoir un effet différent sur l'humidité de l'air.

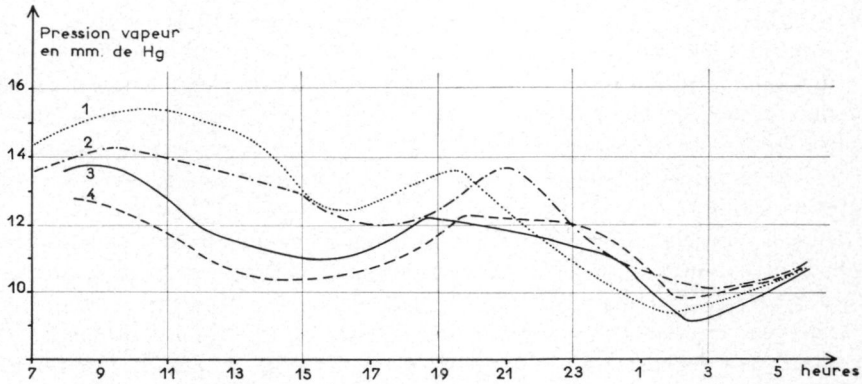


Fig. 11. — *Répartition journalière de l'humidité absolue dans la zone protégée par un brise-vent et dans la steppe ouverte.*

1 — Champ de blé d'hiver dans la zone protégée;
2 — Champ de blé d'hiver dans la steppe ouverte ;
3 — Jachère dans la zone protégée ;
4 — Jachère dans la steppe ouverte ; (d'après Burnackij et Rozhanskaja).

Dans les régions humides ou subhumides, le ralentissement du vent est le facteur décisif et l'on constate une augmentation de l'humidité absolue de l'air pendant la journée, bien que ETR soit réduite. Il en résulte un dépôt de rosée plus précoce. Au cours de la nuit, le refroidissement étant plus grand dans la zone protégée, l'on

observe ensuite une humidité absolue plus faible qu'en zone ouverte. D'ailleurs BURNACKIJ et ROZHANSKAJA (1953) qui ont étudié ce problème ont montré que la tension de vapeur *f* passe par deux maximums et deux minimums au cours de la journée (fig. 11),

1er maximum vers 9 à 11 h	:	évaporation relativement intense ;
1er minimum vers 15 h	:	convection renforcée et régulation stomatique ;
2e maximum vers 21 h	:	conditionné par l'affaiblissement de la convection ;
2e minimum vers 1 à 3 h	:	arrêt de l'évaporation et possibilité de condensation.

L'effet sur l'humidité relative est plus complexe car celle-ci fait intervenir également la température de l'air. Pour une même augmentation de l'humidité absolue, selon l'effet du brise-vent sur le régime thermique de la zone protégée, on pourra observer des variations de sens opposé de l'humidité relative. D'ailleurs NÄGELI (1942) remarque que l'influence des rideaux protecteurs sur l'humidité relative est faible tant qu'on ne considère que la valeur moyenne ; mais l'humidité absolue dans les régions abritées est constamment plus haute que dans les régions découvertes, tandis que les valeurs minimales dans les régions découvertes sont considérablement plus basses qu'entre les rideaux protecteurs.

SOZYKINE (1948) en comparant la carte des déforestations avec celle des déviations thermiques, constate que les isothermes de ces déviations coïncident avec les isolignes de la plus grande déforestation.

Cependant, on constate en général une augmentation de 2 à 4 p. 100 pour l'humidité relative et 0,2 à 1 mm de mercure pour la tension de vapeur (BURNACKIJ et ROZHANSKAJA, 1953), mais il a été observé des accroissements de 8 à 10 p. 100 et 0,6 à 1,4 mm de mercure.

En climat aride, lorsque le brise-vent provoque une augmentation de ETR, il produit également une élévation de l'humidité. Par contre, lorsque le brise-vent est placé dans une région fournissant de l'énergie à l'extérieur, comme la température s'élève, il peut provoquer une diminution de l'humidité surtout s'il s'établit un régime d'autoconvection.

Dans le cas général où le brise-vent provoque une augmentation de l'humidité, celle-ci provient surtout de l'évapotranspiration de la région protégée : c'est ce que confirment les expériences de KREUTZ (1938) et NÄGELI (1953) qui ont opéré avec des brise-vent inertes ainsi que les mesures de BURNACKIJ et ROZHANSKAJA (1953) montrant que l'augmentation d'humidité est plus forte en présence de végétation que sur sol nu.

Cependant, lorsque le rideau protecteur est constitué par une plantation d'arbres, la transpiration de ces derniers augmente certainement l'humidité de l'air, mais il s'agit là, sans doute, d'un fait secondaire.

2.4. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE BILAN RADIATIF DE LA ZONE PROTÉGÉE

La plupart des auteurs ayant étudié cette question constatent qu'un brise-vent n'exerce pratiquement aucune action sur le bilan radiatif de la zone protégée. Le seul effet mentionné est, d'une part, la réflexion des radiations de courte longueur

d'onde par la face au soleil du brise-vent qui augmente la quantité d'énergie reçue par le sol voisin de la barrière et d'autre part, l'ombre portée du côté opposé (Organisation Météorologique Mondiale, 1962).

D'après ces études, un brise-vent ne perturbe que le bilan radiatif de la zone qui lui est très proche : au-delà d'une distance supérieure à 10 fois sa hauteur, son effet ne se fait plus sentir. Mais il faut remarquer que tous ces résultats ont été obtenus dans des climats relativement humides : Allemagne (GEIGER, 1961), Autriche (DIRMHIRN, 1953), Hollande (VAN DER LINDE et WOUNDENBERG, 1946).

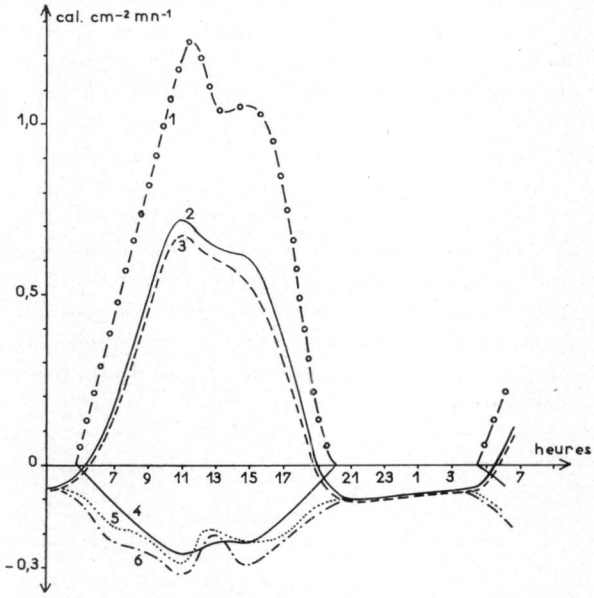


FIG. 12. — *Bilan radiatif des sols cultivés en blé et ses composantes*
1 — Rayonnement global ;
2 — Rayonnement net des zones protégées ;
3 — Rayonnement net de la steppe ouverte ;
4 — Rayonnement réfléchi ;
5 — Rayonnement effectif des zones protégées ;
6 — Rayonnement effectif de la steppe ouverte.
(d'après KHVOLES et CHUDNOVSKIJ).

Les auteurs soviétiques qui ont opéré dans des régions à climat plus sec ont constaté par contre que les brise-vent modifient le bilan radiatif de l'ensemble de la zone protégée (KAGANOV et RJABOVA, 1953) (KHVOLES et CHUDNOVSKIJ, 1958).

On peut essayer de trouver une explication qui permette de concilier ces résultats contradictoires.

On a vu que, les conditions d'évapotranspiration étant différentes dans une zone protégée et dans une zone ouverte, les plantes peuvent avoir leurs stomates plus ou moins ouverts dans la première alors qu'ils sont fermés dans la seconde dans des régions suffisamment sèches.

Des mesures que nous avons effectuées à Tunis en 1961 et à Versailles en 1962 ont permis de constater que la fermeture des stomates des feuilles s'accompagne d'une élévation de leur température dépassant en moyenne 3°C. (cf. DE PARCEVAUX, 1963). Ainsi, dans des régions où les étés sont suffisamment

secs, il est possible que la couverture végétale d'une zone protégée ait une température inférieure de plusieurs degrés à celle d'une zone ouverte. Dans ce cas le rayonnement émis par la première (σT^4, T température absolue de la surface rayonnante — émissivité égale à l'unité) est inférieur à celui émis par la seconde. Ainsi, le rayonnement net [1] d'une zone protégée couverte de végétation est plus élevé que celui d'une zone ouverte. Une variation de la température moyenne journalière de 1° de la surface rayonnante produit une variation du rayonnement net de 10 à 12 $cal.cm^{-2}.j^{-1}$.

KHVOLES et CHUDNOVSKIJ (1958) ont constaté (tableau 9 , fig. 12) que le rayonnement net d'une zone protégée était supérieur de 35 $cal.cm^{-2}j^{-1}$ à celui d'une zone ouverte. Cette différence correspond à un écart moyen de température d'environ 3°C. Sur la figure 12, on constate que l'écart entre le rayonnement net (ou le rayonnement effectif) de la zone protégée et de la zone ouverte se manifeste uniquement au cours de la journée et il est maximal aux heures les plus chaudes.

Dans ce cas les résultats expérimentaux sont en parfait accord avec les hypothèses que nous avons émises et qui permettent également de comprendre pourquoi les brise-vent n'ont pas d'effet sur le bilan radiatif des zones protégées dans les climats humides. En effet, dans ces régions, la fermeture des stomates n'est pas totale et les écarts de température entre la couverture végétale de la zone protégée et celle de la zone ouverte sont faibles ; aussi, il est difficile, étant donné la sensibilité et la précision des appareils employés, de déceler des différences dans le rayonnement émis par le sol et sa couverture végétale.

TABLEAU 9

Bilan radiatif et ses composantes (cal. cm^{-2}. $jour^{-1}$)
(d'après KHVOLES et CHUDNOVSKIJ, 1958)

	Blé		Jachère	
	Zone protégée	Steppe ouverte	Zone protégée	Steppe ouverte
Rayonnement global	670	670	670	670
Rayonnement réfléchi	120	120	55	55
Rayonnement effectif	210	245	235	205
Rayonnement net	340	305	380	410

Lorsque le sol est nu, on constate en général que les températures de l'air et du sol sont plus élevées dans une zone protégée que dans une zone ouverte. En effet un sol nu, par suite de la formation d'un mulch, évapore peu et joue en général le rôle de source chaude pour les cultures voisines. Dès lors, puisque la température est

[1] Rayonnement net : R net = $(1-a)Rg + Ra - \sigma T^4$;
a : albédo = fraction du rayonnement global réfléchi ;
Rg : rayonnement global (rayonnement solaire direct + rayonnement diffusé $< 5\ \mu$) ;
Ra : rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde $> 5\ \mu$;
Rt : rayonnement de la terre, σT^4 à la température absolue T, avec une émissivité égale à l'unité.
Re : rayonnement effectif ; $Re = Rt - Ra = \sigma T^4 - Ra$.

plus élevée en zone protégée, le rayonnement émis par le sol est également plus grand. Le brise-vent diminue donc le rayonnement net de la zone qu'il protège. L'écart de 30 cal.cm^{-2}. jour^{-1} mentionné par KHVOLES et CHUDNOVSKIJ (tableau 9) correspond à une différence de température moyenne journalière d'environ 3°, ce qui est très plausible. La figure 13 montre que ces différences se manifestent seulement au cours de la phase diurne.

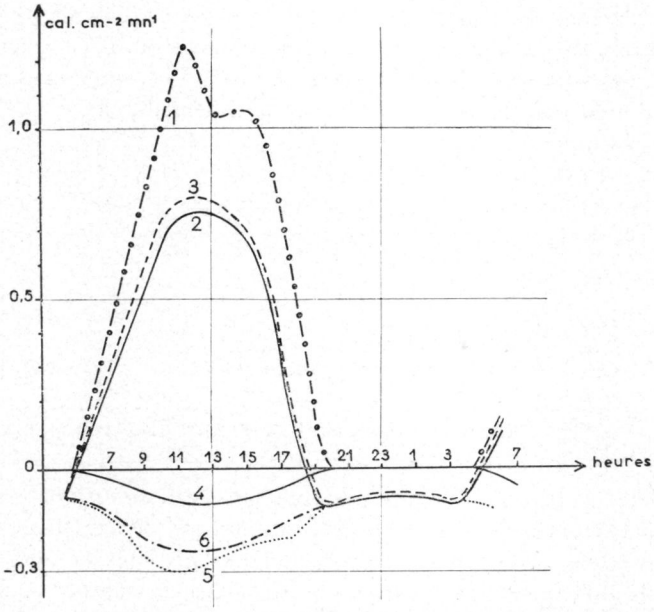


FIG. 13. — *Bilan radiatif des sols en jachère et ses composantes*
1 — Rayonnement global ;
2 — Rayonnement net de la zone protégée ;
3 — Rayonnement net de la steppe ouverte ;
4 — Rayonnement réfléchi ;
5 — Rayonnement effectif de la zone protégée ;
6 — Rayonnement effectif de la steppe ouverte.
(d'après KHVOLES et CHUDNOVSKIJ).

Cependant, un doute subsiste sur la valeur de ces résultats car il semblerait d'après le tableau 9 que la steppe ouverte avec végétation soit plus chaude qu'une jachère. Le problème reste donc posé.

2.5. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LA TENEUR EN GAZ CARBONIQUE DE L'AIR

Le gaz carbonique utilisé par les plantes provient en majeure partie du sol où il est produit de manière continue, par la fermentation des matières organiques. Au cours de la nuit, il se dissipe dans les couches supérieures de l'atmosphère, qui le restituent pendant la journée.

L'implantation d'un brise-vent est accompagnée de deux phénomènes antagonistes :

1°) Une stagnation de l'air qui permet une accumulation du gaz carbonique.

2°) Un accroissement de l'activité photosynthétique des végétaux qui absorbent le gaz carbonique en plus grande quantité. En effet, la densité des végétaux est plus grande dans la zone protégée par un brise-vent et la fermeture des stomates intervient plus tardivement.

En général, on constate que la teneur en CO_2 est plus élevée dans une zone protégée que dans une zone ouverte, au cours de la nuit, tandis que le jour le phénomène inverse est observé (RUSCH, 1955).

En effet, l'assimilation peut utiliser environ 3 fois plus de CO_2 pendant le jour que la respiration du sol n'en fournit pendant ce temps ou même 6 fois plus dans le cas de betteraves sucrières (TAMM et KRZYCH, 1961). On comprend ainsi qu'il ne soit pas possible d'observer une augmentation de la teneur de l'air en CO_2 derrière un brise-vent, au cours de la journée.

Cependant, STEUBING (1952) prétend l'inverse. Mais il s'est placé dans des conditions trop artificielles (sol nu traité avec une forte dose d'engrais organique) pour que ses résultats puissent être considérés comme ayant une valeur universelle.

III. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE SOL

3.1. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR L'ÉROSION ÉOLIENNE

Le problème de l'érosion éolienne présente dans certaines régions une importance capitale : par exemple, dans les territoires du sud-est de la Russie d'Europe, ou les « tempêtes noires » emportent la terre arable des champs. Ce nom de « tempêtes noires » est dû aux quantités énormes de particules de tchernoziom transportées par l'air.

En France, les effets du vent sont moins spectaculaires. Cependant ce problème n'est pas à négliger puisque l'on évalue à 500 000 ha la superficie des terres soumises à l'érosion éolienne (HENIN, 1950, 1960).

Les brise-vent, réduisant la vitesse du vent, diminuent cette érosion, surtout s'ils n'introduisent pas de tourbillons. En effet, l'action abrasive du vent est d'autant plus marquée qu'il progresse par saccades et tourbillons.

Ce problème a été étudié tant sur le terrain qu'en soufflerie (WOODRUFF. et ZINGG, 1953) et la conclusion est la suivante : les brise-vent les plus efficaces pour lutter contre l'érosion sont les semi-perméables qui ne provoquent qu'une faible turbulence (F. A. O., 1956) (KREUTZ et WALTER, 1958).

3.2. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE « CLIMAT DU SOL »

3.2.1. — *Influence sur la température du sol*

Le régime thermique du sol des régions protégées est capital car il peut avoir une influence sur la croissance des plantes. Il est influencé par la présence des brise-vent et par la couverture végétale. En effet, les auteurs soviétiques ont trouvé des effets différents du brise-vent, selon que le sol était nu ou couvert de végétation.

Pour les sols nus, l'effet des rideaux protecteurs se traduit par une augmentation de la température du sol, car les pertes de chaleur par évaporation sont diminuées (tableau 10).

Cet échauffement supplémentaire du sol est un avantage, surtout au printemps, car il permet un départ plus rapide de la végétation.

L'échauffement du sol est sensible jusqu'à une profondeur de 50 cm ; au-delà, il est beaucoup moins important. En surface, par contre, les écarts de température peuvent atteindre 7 à 8°C.

Dans les plaines russes, l'échauffement des sols en jachère est recherché car il permet, à l'automne, un départ plus rapide de la végétation des blés d'hiver.

TABLEAU 10

Températures moyennes du sol par décades à 50 et 100 cm
(d'après BURNACKIJ et ROZHANSKAJA, 1949)

	Jachère				Blé			
	Steppe ouverte		Zone protégée		Steppe ouverte		Zone protégée	
	50 cm	100 cm	50 cm	100 cm	50 cm	100 cm	50 cm	100 cm
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
2e décade mai.....	14,7	8,6	13,0	8,9	12,2	8,5	13,9	8,7
3e décade mai.....	14,9	9,6	14,9	10,8	12,3	8,8	14,1	9,8
1re décade juin	15,3	11,4	16,5	12,8	13,2	9,9	15,3	11,4
2e décade juin	16,2	13,2	17,0	13,5	14,5	11,3	16,0	12,3
3e décade juin	16,5	14,1	17,0	13,7	14,2	11,8	15,8	12,5
1re décade juillet	17,0	14,7	17,7	15,0	14,9	12,5	16,4	13,3

Pour les terrains cultivés les phénomènes sont beaucoup plus tempérés car l'ombrage porté par les plantes limite l'échauffement du sol. Cependant, la température du sol reste en général légèrement plus haute dans la région protégée (BURNACKIJ et ROZHANSKAJA, 1953 ; KAGANOV et RJABOVA, 1953 ; KAISER, 1960). Lorsque le sol est couvert par une végétation suffisamment dense, sa température peut devenir plus basse dans la région protégée que dans la zone ouverte (KAGANOV et RJABOVA, 1953 ; KAZAROV, 1949).

3.2.2. — *Influence sur l'humidité du sol*

L'humidité d'un sol dépend de deux facteurs :

— les précipitations qui permettent la reconstitution des réserves ;

— l'évapotranspiration réelle.

Un brise-vent les modifie tous deux. En général, il augmente les précipitations (solides surtout)(1) reçues par la zone protégée et il diminue l'évapotrans-

(1) Voir chapitre IV.

piration réelle. Dans ces conditions, il est évident que l'humidité du sol de la zone protégée est augmentée.

Dans les régions où les chutes de neige sont abondantes (pays nordiques, steppes russes), le premier facteur prend une importance capitale sans que pour cela le

TABLEAU II

Réserves en eau du sol (mm) au moment des semis (fin août) sur jachère

	1948		1949	
	Couche 0-30 cm	Couche 0-200 cm	Couche 0-30 cm	Couche 0-200 cm
Steppe ouverte	78	510	86	579
Zone protégée	89	650	97	611

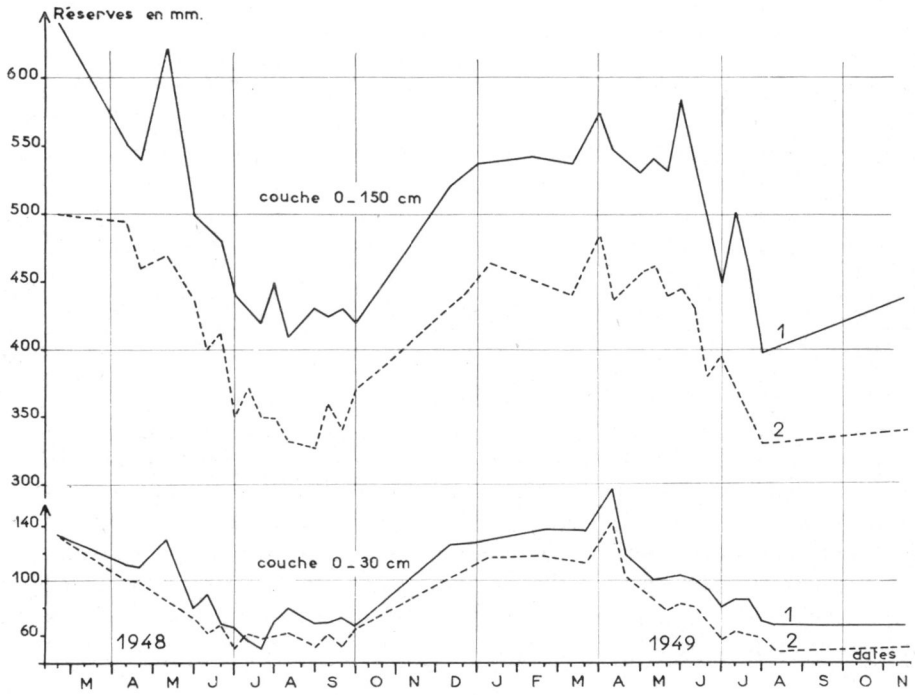


FIG. 14. — *Dynamique des réserves en eau du sol*
1 — Zone protégée ;
2 — Steppe ouverte. (d'après BURNACKIJ et ROZHANSKAJA.)

second soit à négliger. Par exemple, CATRINA et MARCU (1955) constatent qu'après un hiver où les chutes de neige furent peu abondantes, l'humidité moyenne du sol d'une zone protégée, jusqu'à la profondeur de 1,40 m, est supérieure de 3 p. 100 à celle d'une zone ouverte. Cette augmentation est d'ailleurs d'autant plus sensible que l'on est plus près de la surface.

On comprend ainsi que, dans ces régions, un brise-vent augmente sensiblement les réserves en eau du sol comme le montrent d'une part le tableau 11, d'autre part, la figure 14.

Dans les climats plus tempérés, la réduction de l'évapotranspiration réelle est le facteur déterminant dans l'accroissement de l'humidité du sol. C'est ainsi que KAISER (1960) comparant l'humidité du sol d'une zone protégée et d'une zone ouverte jusqu'à la profondeur de 40 cm, constate une augmentation en faveur de la partie abritée de 3 à 11 p. 100.

Enfin, dans les climats arides, on a vu qu'un brise-vent peut augmenter ETR. Dans ce cas, le sol d'une zone protégée est plus sec que celui d'une zone ouverte.

Il faut noter également que les rideaux d'arbres peuvent provoquer l'apparition d'une bande de terrain desséché dans leur voisinage. En effet, les pluies sont généralement accompagnées de vent que les arbres arrêtent en interceptant la pluie et ainsi la quantité d'eau tombant sur le brise-vent est supérieure à celle reçue par une surface identique de terrain plat (CATRINA et MARCU, 1955). Lorsque la vitesse du vent est faible, la trajectoire des gouttes est peu inclinée et la répartition de la pluie reste uniforme. L'augmentation de la vitesse du vent provoque l'apparition d'une zone desséchée du côté sous le vent dont les dimensions sont une fonction croissante de cette augmentation et décroissante de la pénétrabilité du brise-vent.

D'autre part, ce desséchement peut être aggravé par l'extension en surface des racines des arbres (STEUBING, 1952). Pour éviter ce dernier inconvénient, on peut obliger le système radiculaire à s'enfoncer en établissant des fossés le long du brise-vent.

3.3. — INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS DES SOLS

On a vu qu'un brise-vent modifie les conditions de température et d'humidité d'un sol. On peut donc penser que cette modification du micro-climat du sol a des répercussions sur la composition et l'activité de la microflore et de la microfaune. Par conséquent, on doit s'attendre à observer des différences entre une zone ouverte et une zone protégée en ce qui concerne par exemple l'activité des bactéries nitrifiantes, l'évolution de la matière organique. Il est donc possible que des brise-vent installés de longue date, produisent une modification de la structure du sol.

En fait, ce problème a été très peu étudié sauf par quelques auteurs soviétiques. ZAEV (1932) a constaté qu'à 5 m de la bordure d'un rideau forestier, les teneurs en éléments fertilisants, P_2O_5, NO_3 et humus, sont souvent inférieures à celles constatées en steppe ouverte. Mais elles sont deux à trois fois supérieures vers le milieu du champ protégé (70 m). Les acidités (pH et acidité d'hydrolyse) sont plus élevées dans le cas des sols protégés qu'en steppe ouverte.

Des travaux plus récents sont venus confirmer ces premiers résultats et en particulier SUCHOIVANOV (Organisation Météorologique Mondiale, 1962) a pu prouver que l'efficacité des engrais était augmentée de 25 p. 100 dans une prairie âgée de plusieurs années, protégée par des rideaux d'arbres. Cet effet était plus marqué en années de sécheresse.

D'autre part, dans les régions maritimes, les brise-vent interceptent les parti-

cules de sel transportées par le vent (KARSCHON, 1958). TAMATE (1956) constate que la protection est sensible jusqu'à 25 à 30 fois la hauteur des rideaux et qu'elle est d'autant plus nette que le vent est plus fort. Les brise-vent permettent donc, dans une certaine mesure, la diminution de la salure des terres des régions côtières.

IV. — RÔLE HYDROLOGIQUE DES BRISE-VENT

4.1. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LA RÉPARTITION DES PRÉCIPITATIONS

4.1.1. - *Influence du boisement sur les précipitations annuelles*

La forêt joue un rôle de premier plan dans la régulation des caractères pluviométriques et du régime des sources et des cours d'eau (BERNARD, 1945). CHARBOV (1949) constate que dans le cycle des eaux atmosphériques de la plaine de la Russie d'Europe, sur les 480 mm de précipitations moyennes annuelles, 193 mm seulement sont dus à un apport extérieur (océan Atlantique, mer Baltique), le reste, soit 287 mm est fourni par le cycle local des eaux.

Les déforestations systématiques opérées dans cette plaine ont d'une part augmenté l'écoulement rapide des eaux et leur drainage vers les mers et d'autre part supprimé une importante source d'humidification de l'air : la transpiration des arbres.

L'établissement de brise-vent dans de telles régions doit donc permettre une activation du cycle intérieur des précipitations (TREGUBOV, 1960) grâce à l'augmentation de l'humidité de l'air entraînée par celle de ETR. En effet, les nuages d'origine extérieure au territoire, arrivant dans un air plus humide, disparaissent moins facilement, les gouttes de pluie s'évaporent moins pendant leur chute et l'alimentation du système nuageux par l'évaporation du sol est meilleure.

GEIGER (1961) considère que pour de grandes surfaces boisées, la réduction de l'évaporation des gouttes d'eau entraîne une augmentation des précipitations de 1 à 2 p. 100 en général mais qui peut dépasser 5 p. 100 en Europe centrale.

Au Jutland, DALGAS (1939) a montré que l'implantation de rideaux d'arbres a augmenté notablement les précipitations. Dans le Jutland central, elles sont passées, pour la période avril-juin, de 100 à 150-160 mm et pour le Jutland de l'Ouest de 100 à 120-140 mm. Mais, dans certaines conditions climatiques, le boisement d'une région peut produire, au contraire, une diminution des précipitations. BERNARD (1945) a montré que le refroidissement de l'atmosphère causé par les forêts, au Congo, provoque une diminution des précipitations dans les régions où les pluies de convection sont prépondérantes. En effet, l'abaissement de température de l'air produit une augmentation de la pression barométrique et l'appel de masses d'air maritime, qui apportent l'eau alimentant le cycle intérieur des précipitations, est diminué.

4.1.2. - *Influence des brise-vent sur la répartition de la pluie*

La pluie est en général accompagnée de vent et la trajectoire des gouttes est, de ce fait, inclinée. Ainsi, un rideau protecteur intercepte une partie de la pluie destinée à la zone protégée et la quantité d'eau reçue immédiatement du côté sous

le vent, est plus faible que dans une zone ouverte. Par contre, le ralentissement du vent dans le reste de la zone protégée augmente le volume des précipitations reçues (STEUBING, 1952).

KARSCHON (1958) a étudié l'effet d'un brise-vent sur la répartition spatiale des précipitations et a mesuré l'écart entre le minimum près du rideau et le maximum au milieu de la zone protégée. Il a trouvé que si, en général, cet écart ne dépasse pas 15 p. 100 de la lame d'eau mesurée en rase campagne, par contre, il peut atteindre 53 p. 100 et même 81 p. 100 par très forts coups de vent (valeur 7 de l'échelle de Beaufort).

4.1.3. - *Influence des brise-vent sur la répartition de la neige*

Tous les auteurs reconnaissent que le dépôt de neige dans une zone protégée par un brise-vent est supérieur à celui d'une zone ouverte (ALISSOW, et *al.* 1956 ; ASLYNG, 1958 ; BURNACKIJ et ROZHANSKAJA, 1953 ; GEORGE et *al.* 1957 ; MARCU et IONESCU, 1959 ; PANFILOV, 1954; STEUBING, 1952; TKATCHENKO, 1960 ; WOODRUFF, 1954).

L'effet d'un brise-vent sur la répartition de la neige est beaucoup plus spectaculaire que son effet sur la pluie. Le processus qui tend à augmenter le dépôt de neige dans la zone protégée est le même que celui indiqué pour la pluie, mais il s'y ajoute un facteur supplémentaire : la diminution des quantités de neige soufflée. Ceci explique la régularité de l'épaisseur du dépôt de neige dans une zone protégée. De plus, les bandes forestières arrêtent tout ce qui peut être soufflé et c'est pourquoi, à l'intérieur de celles-ci, et surtout sur leurs lisières, la quantité de neige peut être importante. Voici, par exemple, les chiffres que donne BASOV (1948) pour les réserves d'eau provenant de la neige :

Steppe ouverte	46-52 mm
Clairières des bandes	64-80 mm
Lisières des bandes	197-303 mm
Dans les bandes	116-251 mm

D'autre part, l'augmentation du dépôt de neige dépend de la perméabilité du brise-vent : il est plus important derrière une barrière pénétrable que derrière une barrière dense (NÄGELI, 1953).

4.1.4. — *Influence des brise-vent sur le dépôt de rosée*

L'importance du dépôt de rosée dépend essentiellement de deux facteurs :
— le refroidissement nocturne;
— l'humidité de l'air.

On a vu qu'un brise-vent a pour effet d'accroître l'humidité absolue de l'air et le refroidissement nocturne de la zone qu'il protège ; on peut donc s'attendre à ce qu'il augmente le dépôt de rosée.

Le maximum de rosée correspond au minimum de température et c'est pourquoi, il se trouve en général à une distance égale à 2 à 3 fois la hauteur du brise-vent du côté sous le vent (STEUBING, 1952-53).

D'autre part, le refroidissement nocturne étant influencé par les conditions de rayonnement, l'écart entre le dépôt de rosée de la zone ouverte et celui de la zone protégée est plus grand par nuit claire. Le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le brise-vent limite le refroidissement de la région qui lui est proche, ce qui provoque un éloignement du minimum de température donc du maximum de rosée.

Dans les pays de bocage où ETR n'est guère augmentée, la quantité globale de rosée déposée n'est pas supérieure à celle d'un pays ouvert mais la répartition spatiale de l'eau condensée n'est pas homogène (STEUBING, 1952-53).

De même, l'implantation de rideaux d'arbres dans une région de steppes produit un appel d'humidité dans la zone protégée plus froide que les régions avoisinantes. Cet apport d'humidité n'est pas négligeable. C'est ainsi que BASOV (1948) trouve que les dépôts annuels d'humidité atmosphérique sont de 58,0 mm dans la steppe contre 109,3 mm dans une zone boisée. Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec les chiffres donnés par STEUBING (1952) qui constate une augmentation de 200 p. 100 du dépôt de rosée dans la région abritée par un brise-vent par rapport à une région ouverte.

4.1.5. — *Capture par un brise-vent des gouttelettes en suspension dans l'air*

Contrairement à la rosée qui se dépose sur les parois froides, le brouillard étend une nappe qui baigne l'ensemble de la végétation. Aussi, l'humidification produite par ce dernier est différente de celle due au dépôt de rosée. La condensation du brouillard n'est importante qu'au voisinage du brise-vent et surtout du côté au vent. En effet, les gouttelettes d'eau transportées par l'air sont captées par les branches et le feuillage des rideaux forestiers et produisent fréquemment des quantités d'eau non négligeables qui tombent sur le sol et l'humidifient localement. Ainsi que le montre le tableau 12 la quantité d'eau reçue près de la haie a été jusqu'à 4 fois plus élevée qu'à une distance de 8 m (KAISER, 1960).

Des études faites au Japon sur la capture des particules de brouillard maritime par les brise-vent sont venues confirmer les résultats précédents. En effet,

TABLEAU 12

Condensation en g/dm²

Date	Distance de la haie en m		Différence
	0,50	8,0	
20-10-1951	2,05	0,56	1,49
21-11-1951	1,92	0,91	1,01
5-11-1951	1,11	0,45	0,66

N.B. Condensation du brouillard mesurée avec le roséomètre de Leich dans la zone de chute des gouttes d'une haie de 2 m de haut et à la distance de 8 m.
Hiddensee — (d'après STEUBING, 1952—53)

il a été observé que pour une teneur en eau du brouillard de 0,3 g/m³ et une vitesse du vent de 3,4 m/s en zone ouverte, des quantités d'eau de 1 mm/heure étaient interceptées du côté au vent d'un rideau protecteur expérimental de 2 m de haut et 13 m de large au milieu de prairies (KASHIYAMA 1958).

4.2. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE RUISSELLEMENT

BASOV (1948) a étudié la relation existant entre le boisement d'un bassin versant et le coefficient d'écoulement. Il a constaté une diminution de ce coefficient de 1,5 fois entre deux ruisseaux voisins : l'un coulant dans la steppe et l'autre dans une zone partiellement boisée. Pour ce dernier ruisseau dont le bassin versant a 6 p. 100 de sa surface recouverts de plantations forestières, le coefficient d'écoulement a diminué de 1,72 à 2 fois depuis le boisement. En outre, un ruisseau dont le bassin versant a 18 p. 100 de sa surface boisés, a un coefficient d'écoulement pratiquement nul.

La diminution du coefficient d'écoulement par l'implantation de rideaux d'arbres se manifeste surtout dans les pays tels que la plaine de la Russie d'Europe au moment de la fonte des neiges. En effet, la présence de rideaux protecteurs permet d'élever la température du sol et la régularité de la couche de neige aidant, la pénétration du gel est moins importante. Elle n'a été par exemple que de 40 à 45 cm dans les zones protégées contre 65 à 70 cm dans la steppe ouverte (BODROV, 1935). De plus, les alternances de gel et de dégel, dans la steppe, provoquent la formation d'une croûte de glace sur le sol, tandis qu'à l'intérieur même des bandes forestières, la pénétration du gel peut être insignifiante (BASOV, 1948), et la croûte de glace absente. Ceci est important lors du dégel. En effet, l'eau peut pénétrer immédiatement dans le sol des bandes forestières alors que dans la steppe la plus grande partie ruisselle sur la croûte de glace ou bien est arrêtée par le sol gelé profondément.

4.3. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LA NAPPE PHRÉATIQUE

On a vu que les brise-vent produisent dans la zone protégée :

1°) Une augmentation des précipitations solides et liquides;

2°) Une diminution du ruissellement.

Ces effets se traduisent finalement par une meilleure alimentation de la nappe phréatique. C'est ainsi que BASOV (1948) constate que les eaux souterraines reçoivent dans la steppe au printemps 23 à 26 mm d'eau alors qu'en zone boisée à 6 p. 100, elles reçoivent 64 mm et pour un boisement de 18 p. 100, 124 mm. Dans la steppe, la nappe phréatique n'est d'ailleurs pas toujours alimentée. En effet, la reconstitution des réserves se fait en général au moment de la fonte des neiges (fig. 14) (KHARITONOV, 1949) et lorsque l'eau est mal utilisée, il existe souvent un « horizon mort » qui est une zone desséchée située entre la nappe phréatique et les couches humides de la surface. La plantation de rideaux d'arbres permet l'humidification de ce niveau et on obtient ainsi un régime hydrique de type communiquant (DENUYL, 1936).

Dans tous les cas, le meilleur coefficient d'alimentation de la nappe phréatique permet une élévation de son niveau au printemps, supérieure à celle de la steppe. BASOV (1948) donne les chiffres suivants :

Steppe	0,61 m
Clairières	0,79 m
Bandes forestières ..	1,56 m
Lisières	1,60 m

En général, le stockage de l'eau dans les zones protégées est supérieur à la consommation des végétaux pendant l'été et c'est ainsi que le niveau moyen de la nappe phréatique s'élève d'une année à l'autre (tableau 13) (LABOUNSKY, 1949).

TABLEAU 13

Variation du niveau de la nappe phréatique sous l'effet d'un reboisement à Véliki Anadol (d'après LABOUNSKI)

N° des puits d'observations	Distance en m de la surface du sol jusqu'au niveau des eaux, en		Élévation de la nappe entre 1893 et 1947 en m
	1893 (Steppe)	1947 (après reboisement)	
1	11,90	9,68	2,22
2	7,08	2,00	5,08
3	8,68	3,87	4,81
4	8,55	1,80	6,75
5	10,80	10,30	0,50
6	11,30	9,30	2,00
7	4,00	3,00	1,00
8	3,40	1,40	2,00
9	13,43	10,10	3,33
10	21,65	17,60	4,05
11	6,00	4,32	1,68
12	4,00	1,65	2,35
13	5,68	3,30	2,38
14	5,35	4,70	0,65
15	6,22	6,00	0,22
16	15,30	12,00	3,30

V. — INFLUENCE DES BRISE-VENT SUR LE RENDEMENT

5.1. — LES INCONVÉNIENTS DES BRISE-VENT

Les brise-vent ont parfois des adversaires ; il faut donc examiner ce qui justifie leurs critiques.

Selon leur orientation, les brise-vent risquent d'ombrager une partie du champ protégé, donc de retarder la croissance des végétaux au printemps et de limiter leur développement en cours d'année (LUPE, 1956). Ce problème est important

dans le midi de la France où les brise-vent orientés est-ouest sont très serrés. (cf. photo 1 p. 477).

Les compétitions radiculaires près du rideau protecteur, peuvent également abaisser le rendement (VAN DER LINDE, 1954 ; STEUBING, 1952-53 ; STEUBING, 1960). Cependant, ce phénomène ne se manifeste que dans une bande étroite qui, en général, ne dépasse pas la moitié de la hauteur du brise-vent.

CASTELLANI et PREVOSTO (1961) ont constaté effectivement, dans la vallée du Pô, des baisses de rendement dues à l'effet combiné des deux facteurs précédents, dans une bande de 15 à 25 m de large, derrière des rideaux de peupliers. Cette diminution de rendement a atteint 21,4 à 25,6 p. 100 pour le blé et le riz et 19,5 p. 100 pour les prairies, dans des champs situés au nord des rideaux. A partir de ces résultats, ils en sont venus à négliger l'effet protecteur de ces bandes forestières.

Cependant, un inconvénient beaucoup plus grave est l'accroissement du risque de gelées printanières qui peut faire proscrire l'usage de certains brise-vent. Ceci s'observe surtout avec des brise-vent denses.

C'est également derrière eux que peuvent se produire des élévations de température néfastes à la végétation.

Il arrive que dans les régions humides, l'augmentation de l'humidité de l'air retarde la maturation de certaines cultures et en particulier des céréales.

Il faut signaler également que les brise-vent peuvent devenir le refuge d'une flore et d'une faune nuisibles aux cultures.

Enfin, les brise-vent occupent une certaine surface perdue pour la culture.

Cependant, malgré ces dangers, les avantages l'emportent généralement et il est prouvé que l'implantation de rideaux protecteurs est bien le plus souvent accompagné d'un accroissement de rendement.

5.2. — LES AVANTAGES DES BRISE-VENT

Les premiers brise-vent furent établis pour réduire les dégâts causés par les effets mécaniques du vent (cf. photo 2 p. 479).

On a vu qu'ils permettent également une meilleure reconstitution des réserves en eau du sol.

Il ne faut pas oublier non plus qu'ils peuvent servir de refuge à une flore et à une faune utiles.

Cependant, l'accroissement de rendement dans la zone protégée par un brise-vent dépend essentiellement de son effet sur l'évapotranspiration. On a vu que cet effet est différent selon les conditions climatiques mais qu'en général ETP est réduite. Les principaux avantages des brise-vent sont liés à cette réduction :

— Élévation de la température de l'air dans les climats humides et abaissement de celle-ci dans les climats secs ;

— Augmentation de l'humidité de l'air et, dans certaines conditions, de celle du sol ;

— Augmentation de la température du sol au printemps ;

— Amélioration, dans une certaine mesure, des propriétés physiques et chimiques du sol.

Enfin et surtout, augmentation de l'activité photosynthétique des végétaux, les stomates restant ouverts pendant une plus grande partie de la journée.

En effet, l'intensité de la photosynthèse est liée à l'ouverture des stomates, ceux-ci permettant non seulement la diffusion de la vapeur d'eau mais également celle du gaz carbonique et de l'oxygène. Lorsque la régulation stomatique intervient, elle réduit non seulement la transpiration mais également la quantité de matière sèche produite (BOUCHET et de PARCEVAUX 1962, 1963).

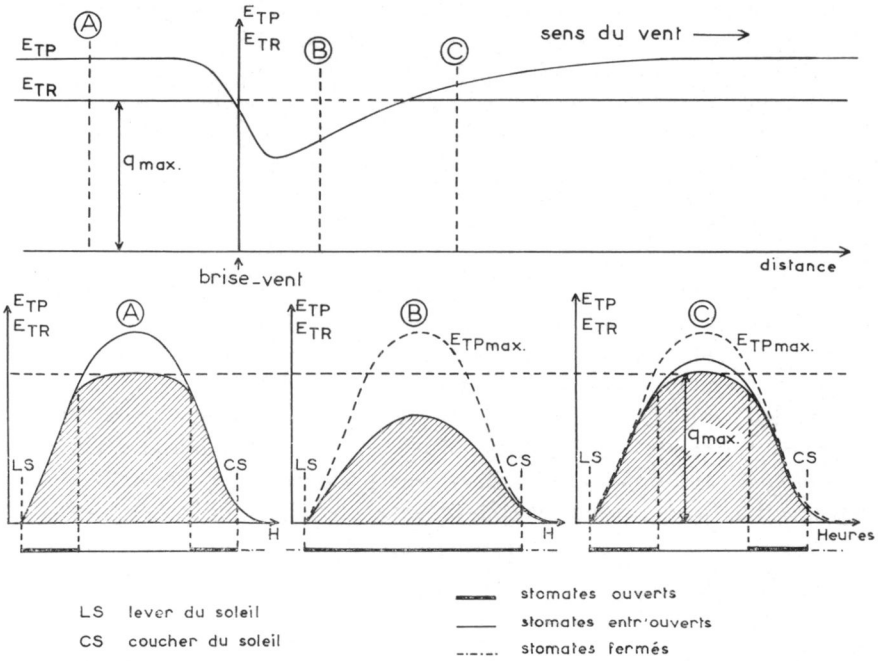


FIG. 15. — *Schéma résumant l'influence d'un brise-vent sur le rendement dans une région subhumide*
La partie supérieure représente la variation de ETP et ETR en fonction de la distance au brise-vent au moment où ETP est maximale ;
(A) (B) (C) indiquent la variation journalière de ETP et ETR à différentes distances du brise-vent.

On a vu (§ 2.1) que, dans les conditions naturelles, les stomates des végétaux ne sont en général ouverts que pendant une partie de la journée. Chaque jour, la plante synthétise donc moins de matière sèche qu'elle n'en a la possibilité.

La réduction d'ETP dans une région où le débit *q* max. que les végétaux sont susceptibles de fournir est inférieur à ETP maximale, permet un accroissement de l'activité photosynthétique, car les stomates restent ouverts pendant une plus grande partie de la journée (BOUCHET et de PARCEVAUX, 1962, 1963).

La figure 15 représente le cas d'une région subhumide dans laquelle la régulation stomatique intervient pendant une partie de la journée sans que le flétrissement temporaire se manifeste. On a vu que, dans ce cas, un brise-vent produit une réduction d'ETP et d'ETR (fig. 9 A). La partie supérieure de la figure 15 représente la variation d'ETP et d'ETR en fonction de la distance au brise-vent au moment où ETP est maximale. La partie inférieure indique l'évolution journalière de ETP

et de ETR à différentes distances du brise-vent. La partie (A) correspond à la zone ouverte. En (B), ETP est toujours inférieure à q max. Dans ces conditions, les stomates des plantes de cette région restent ouverts pendant toute la journée. La quantité de matière sèche synthétisée est maximale. (C) représente le cas intermédiaire : la régulation stomatique intervient pendant une partie de la journée mais ETP reste constamment inférieure à celle de la zone ouverte. Dans ce cas, les stomates restent comme on peut le voir sur la figure, ouverts pendant une plus grande partie de la journée.

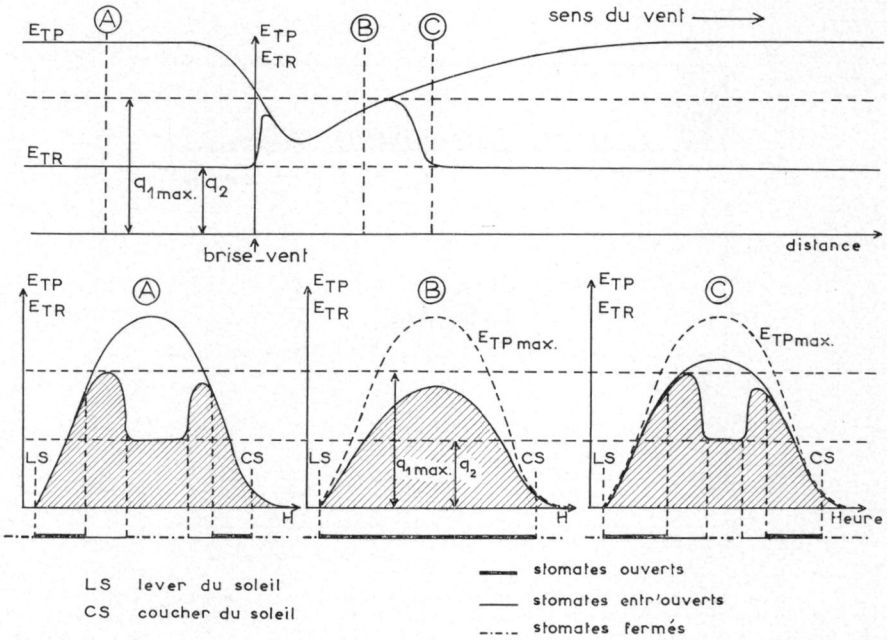


FIG. 16. — *Schéma résumant l'influence d'un brise-vent sur le rendement dans une région aride*
La partie supérieure représente la variation de ETP et ETR en fonction de la distance au brise-vent au moment où ETP est maximale.
(A) (B) (C) indiquent la variation journalière de ETP et ETR à différentes distances du brise-vent.

De plus, on peut remarquer sur la figure 15, que lorsque la quantité de matière sèche produite augmente, la quantité d'eau consommée diminue : en A, la quantité de matière sèche produite est la plus faible et la quantité d'eau consommée (partie hachurée) est la plus grande, tandis qu'en B, on observe l'inverse. L'efficacité de l'eau (quantité de matière sèche produite pour un poids donné d'eau) a donc été augmentée (BOUCHET et de PARCEVAUX, 1962, 1963).

Dans le cas où les plantes se flétrissent pendant une partie de la journée (fig. 16), on arrive aux mêmes conclusions que précédemment : la quantité de matière sèche produite et l'efficacité de l'eau sont augmentées dans la zone protégée. Mais par contre, il est possible que le brise-vent accroisse la consommation d'eau.

Lorsqu'un brise-vent réduit ETP, il augmente donc le rendement et la courbe représentant la variation de ce dernier en fonction de la distance au rideau a une forme inverse de celle de ETP. En effet, au minimum d'ETP correspond le maximum de rendement et inversement.

Mais à cette action de ETP sur le rendement, il faut ajouter les autres influences exercées par le brise-vent.

Si, près du rideau, les compétitions radiculaires et l'ombrage provoquent une diminution de la récolte, plus loin dans la parcelle protégée l'accroissement des précipitations permet d'augmenter le débit q max. que les végétaux sont susceptibles de fournir, ce qui accentue encore les effets dus à la diminution de ETP. On peut donc prévoir une variation du rendement en fonction de la distance au brise-vent, telle que l'a représentée BATES (1944) à partir d'un grand nombre de mesures (fig. 17).

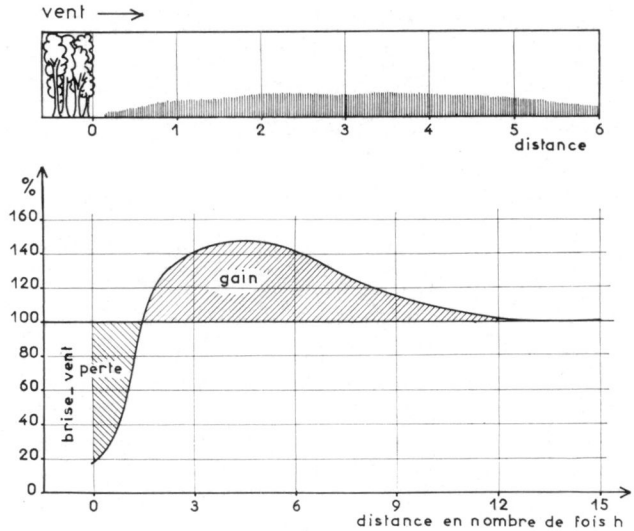


FIG. 17. — *Influence d'un brise-vent sur le rendement d'un champ de céréales.*
En haut est représentée une coupe du champ proche du brise-vent montrant la variation de la hauteur des plantes. (d'après BATES)

TABLEAU 14

Rendements observés dans les kolkhoses de Timochévo (province de Kouibychev, Transvolojie) en 1950, *après plantation, en* 1935-36, de 1 200 *ha de bandes forestières* (TKATCHENKO, 1960)

Cultures	A l'abri des bandes forestières	Dans la steppe ouverte	Surplus de récolte dû aux bandes forestières (%)
Blé d'hiver	24	17	41
Blé de printemps	17	14	21
Seigle d'hiver	25	17	47
Avoine	22	18	22
Tournesol	13	11	18
Luzerne + agropyrum (foin)	62	32	94
Luzerne + brome inerme (foin)	59	32	85

Les nombreuses études entreprises dans le monde confirment pleinement ces hypothèses. Ainsi obtient-on les effets les plus spectaculaires dans les climats assez secs, avec des plantes à faible enracinement comme les prairies (q max. petit par rapport à ETP).

C'est ainsi que l'on a enregistré fréquemment des augmentations de plus de 100 p. 100 de la production de prairies dans les steppes desséchées de la Russie du Sud, alors que de tels accroissements n'ont jamais été observés pour les céréales par exemple.

On remarque d'ailleurs que, dans ces régions, l'effet d'un brise-vent est beaucoup plus sensible en année sèche qu'en année humide (tableau 15).

TABLEAU 15

	Kolkhose « Vague de la Révolution »	Kolkhose « Staline »	Différence au profit du second
Superficie cultivée (ha)	2 054	3 381	—
Superficie globale des bandes forestières (ha)	21	194	173
Récolte moyenne des céréales en q/ha :			
Années :			
1944	8,5	11,7	3,2
Années sèches 1945	5,0	12,1	7,1
Années sèches 1946	9,4	14,8	5,4
Années sèches 1947	5,9	16,2	9,3
1948	13,6	17,5	3,9

TABLEAU 16

Influence d'un brise-vent sur la récolte et la consommation d'eau
Extrait d'un tableau dû à NICOTA (1961)

Année	Distance à l'abri	Consommation d'eau m³/ha	Rendement q/ha	Eau utilisée pour produire 1 t de grains
1957	0-2,5 h	2 566	16,9	1 520
	0-12 h	2 461	19,0	1 296
	0-22,5 h	2 386	18,1	1 325
	moyenne	2 486	18,0	1 375
	témoin	2 436	16,0	1 520
1958	0-2,5 h	2 182	15,3	1 426
	0-12 h	2 232	17,2	1 297
	0-22,2 h	2 057	14,7	1 400
	moyenne	2 132	15,7	1 358
	témoin	2 057	13,6	1 512

En Yougoslavie, NICOTA (1961) (tableau 16) a montré que, tout en augmentant la quantité d'eau consommée, les brise-vent accroissent le rendement dans une plus grande proportion ; l'efficacité de l'eau est donc augmentée ce qui est conforme à notre interprétation schématisée figure 16.

En Roumanie CALUIANU et *al.* (1959) ont enregistré à Marculesti des augmentations de rendement de 23 p. 100 pour le blé, 14 à 34 p. 100 pour le maïs et 24 à 67 p. 100 pour les prairies. LUPE (1956) de son côté avait noté des accroissements de récolte de 20 à 50 p. 100 pour le blé et 18 p. 100 pour l'avoine.

Au Canada (région à climat tempéré continental), STAPLE et LEHANE (1955) ainsi que PELTON (Organisation Météorologique Mondiale, 1962) constatent que les brise-vent augmentent le rendement du blé et la consommation d'eau, mais permettent cependant une meilleure utilisation de celle-ci (fig. 18).

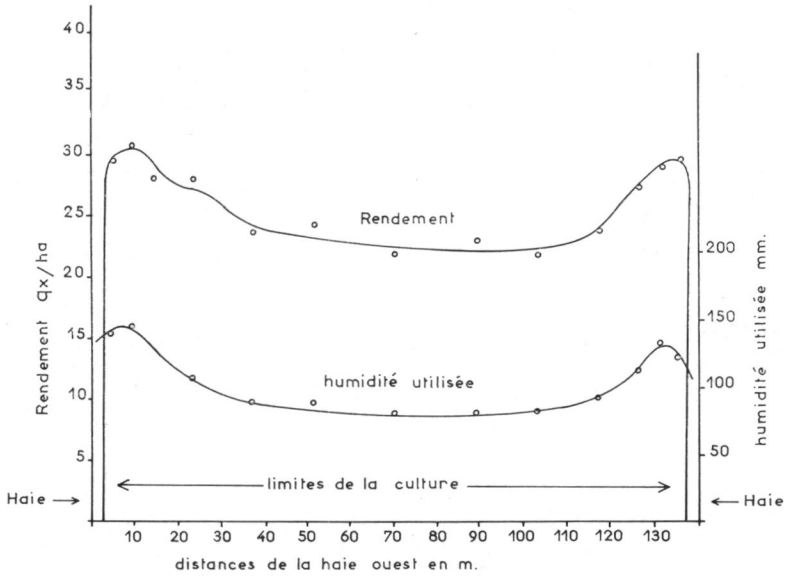


FIG. 18. — *Rendement et humidité utilisée par une culture de blé située entre deux rideaux protecteurs orientés nord-sud*
(d'après STAPLE et LEHANE)

Même dans des climats plus humides, l'effet des brise-vent est encore sensible. C'est ainsi que BOUCHET et de PARCEVAUX (1962) ont constaté au cours de l'année 1962 une augmentation de rendement du blé et une diminution de la quantité d'eau consommée en Beauce (tableau 17).

Dans les régions où les étés sont encore plus humides, les brise-vent exercent une influence non négligeable sur le rendement. C'est ainsi que HANKE et KAISER (1954) en Allemagne rhénane constatent, derrière un rideau protecteur constitué par des nattes en fibre de coco ayant 50 p. 100 de vides, un accroissement moyen du rendement d'un champ de betteraves de 6 à 7 p. 100 jusqu'à une distance du rideau égale à 30 fois sa hauteur et de 10 à 14 p. 100 jusqu'à une distance de 18 fois sa hauteur Pour un champ d'avoine, l'augmentation moyenne du rendement a été de 9,2 p. 100 pour la partie du champ large de 30 fois la hauteur de la barrière (HANKE et KAISER, 1957).

TABLEAU 17

	Témoin	Réduction de ETP	
		Non irrigué	Irrigué
Rendement moyen q/ha—humidité 15 %	68,3	78,7	86,3
	(100)	(115)	(126)
Poids de 1 000 grains en g	53,1	53,3	51,8
Bilan hydrique :			
Pluie en mm	93	93	93
Irrigation en mm	0	0	186
Prélèvement dans le sol	320	280	110
Eau totale consommée	413	373	389
Efficience de l'eau :			
Rapport $\frac{\text{eau totale consommée}}{\text{poids de grains}}$	605	470	450
Données physiologiques :			
Rapport $\frac{\text{transpiration instantanée}}{\text{évaporation instantanée}}$	0,22	0,25	0,29
	(100)	(114)	(131)
Indice foliaire (1.7.62)	4,4	4,7	5,3

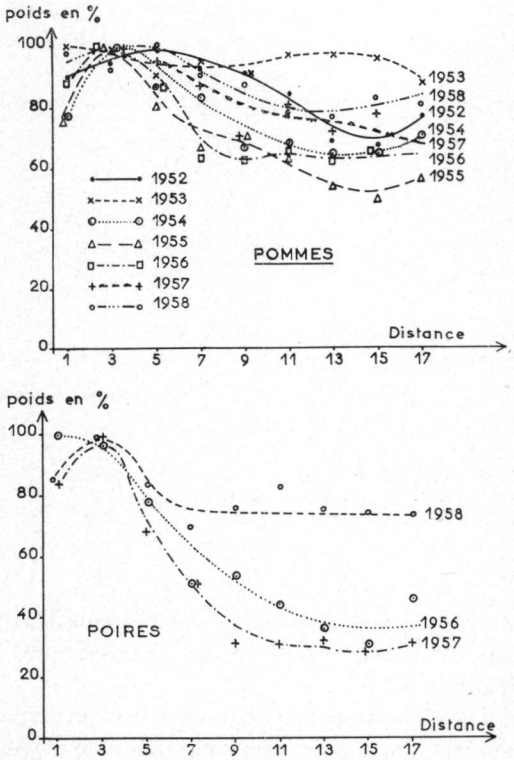


FIG. 19 — *Influence d'un brise-vent dense sur la production d'arbres fruitiers* (d'après VAN RHÉE)

En Hollande, VAN RHEE (1957, 1959, 1961) a étudié l'effet de brise-vent denses sur la production des arbres fruitiers et il a obtenu des courbes de variation du rendement en fonction de la distance au brise-vent en parfait accord avec la théorie exposée (fig. 19)

Au Danemark, JENSEN (1954) constate un accroissement moyen de la production de 7 à 9 p. 100 pour une réduction moyenne du vent de 68 p. 100 et 4,3 p. 100 pour une réduction de 37 p. 100 (MARION, 1960).

De même SOEGAARD (1954) a enregistré une augmentation du rendement, d'ailleurs beaucoup plus sensible, sur prairies (tableau 18).

TABLEAU 18

I — Céréales

Cultures	% accroissement du rendement avec l'abri	
	grain	paille
Seigle (3 essais)	14,6	10,6
Blé (1 essai)	11,1	12,6
Avoine (8 essais)	19,5	19,3
Orge (1 essai)	18,8	33,1

II. — Plantes à racines

Cultures	% accroissement du rendement
Betteraves (6 essais)	23,2
Navets (5 essais)	6,5
Pommes de terre (10 essais)	16,5

III. — Fourrage vert

Herbe	% accroissement du rendement
Graminées et trèfle (8 essais)	24,1
Luzerne (1 essai)	21,5
Lupin (1 essai)	48,9

Ainsi, il est prouvé que lorsqu'un brise-vent diminue ETP, il augmente le rendement. Inversement, il découle de la théorie exposée que, lorsqu'un brise-vent augmente ETP, il le diminue.

En conclusion, l'implantation des brise-vent est bénéfique dans presque tous les cas. Leur emploi est particulièrement recommandé dans les régions humides et subhumides. Dans les climats arides, leur utilisation ne peut se concevoir qu'en

zone irriguée. On a vu, en effet, que les régions arides jouent généralement le rôle de « source chaude » pour les territoires voisins. Un brise-vent implanté dans ces conditions produit une augmentation de ETP et une élévation de la température. CABORN (1957) cite des exemples où la température de l'air devient supérieure de 6 à 7° à celle de la zone ouverte. Le brise-vent peut alors avoir un effet néfaste sur la végétation. C'est ainsi que l'on a observé que des orangers cultivés sur sol nu en Afrique du Nord étaient brûlés derrière des rideaux de cyprès. Par contre, l'irrigation permet à la zone protégée de jouer le rôle de « source froide » pour les terrains qui l'entourent, ce qui provoque l'inversion de l'effet du brise-vent.

Finalement, les brise-vent ne présentent, sous l'angle du rendement, que des avantages aussi bien en zones subhumides que dans les zones plus sèches à condition toutefois, dans ce dernier cas, d'avoir recours à l'irrigation.

VI. — LE PROBLÈME DES BRISE-VENT EN FRANCE

En France, le seul effet reconnu des brise-vent auquel on ait prêté pratiquement attention, est leur action mécanique. C'est pourquoi ils ne sont employés que dans les régions fortement ventées comme le Midi. Mais leur rôle de modificateurs de microclimat, pourtant capital, a rarement été envisagé. Or, si l'on considère les brise-vent sous cet angle, beaucoup d'autres régions seraient intéressées par leur utilisation. D'ailleurs, l'implantation systématique de rideaux d'arbres dans des pays situés au nord de la France prouve que cette idée n'a rien d'utopique.

6.1. — LES BRISE-VENT DES RÉGIONS MÉDITERRANÉENNES

Dans ces régions, les brise-vent ont été établis surtout au milieu du siècle dernier, dans le but de lutter contre les vents violents (Tramontane, Mistral), cause de dommages dans les cultures maraîchères et les vergers, ainsi que d'une érosion éolienne notable (par exemple, dans la région de Nimes, les monuments romains datant de 2000 ans sont en contrebas de plus de 1 m, ce qui correspond à un apport éolien de 0,5 mm par an).

6.1.1. — *Les brise-vent employés*

Selon le type de culture (maraîchage intensif, vergers, grandes cultures) et selon les caractéristiques du sol (propriétés physiques et chimiques, humidité), les brise-vent employés sont conçus différemment et les espèces qui les constituent ont été choisies pour répondre à 3 conditions (Compagnie nationale d'Aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc, 1961) (REBOUR, 1957) :

— avoir des feuilles si possible pendant toute l'année ;
— pousser très rapidement ;
— posséder un système radiculaire tel que la concurrence radiculaire soit limitée;
— avoir un encombrement réduit.

Pour ces raisons, ce sont principalement des conifères qui ont été retenus.

6.1.1.1. — *Les conifères.*

A — *Les Cyprès* — C'est le brise-vent classique qui s'accommode de terrains pauvres et secs. Il existe plusieurs espèces dont la hauteur peut atteindre 8 à 10 m en 8 à 10 ans en culture irriguée (REBOUR, 1950) (VAN RHEE, 1959).

Cyprès pyramidal : (*Cupressus sempervirens fastigiata*). Il a les branches très serrées et, planté en une seule rangée avec un espacement sur la ligne de 0,50 à 0,80 m, il constitue des rideaux imperméables (BORDAS, 1946) (Compagnie du Bas-Rhône Languedoc 1961) (REBOUR, 1957), utilisés surtout pour protéger les cultures maraîchères intensives (fraises, melons). De tels brise-vent permettent au printemps un réchauffement rapide pendant la journée et augmentent ainsi la précocité. Mais ils présentent un grand nombre de défauts dus à leur manque de perméabilité.

Tout d'abord, ils ne protègent qu'une faible étendue qui ne dépasse pas en général 10 fois leur hauteur (de BOIXO, 1960 ; REBOUR, 1957) : C'est pourquoi l'écartement entre deux lignes successives est presque toujours inférieur à 50 m (hauteur de l'ordre de 4 à 5 m).

De plus, l'effet protecteur diminue très rapidement lorsqu'on s'éloigne du rideau par suite de la formation de tourbillons (cf. fig. 1-2-3). C'est ainsi que dans le Vaucluse, on considère que la protection n'est parfaite derrière une haie de cyprès de 4 m de haut que pour une bande de 7 m de large (soit environ 2 fois la hauteur) (Compagnie du Bas-Rhône Languedoc, 1961) ; aussi est-on obligé d'implanter des haies mortes intermédiaires.

D'autre part, lorsque le vent est très fort, la perméabilité des rideaux diminue (1-2-6) et le vent peut s'inverser dans la zone protégée. Ainsi, les agriculteurs de la vallée du Rhône ont pu remarquer que, par jour de fort mistral, ils avaient non pas un vent du nord mais un vent du sud derrière leurs brise-vent.

L'intense brassage de l'air qui se produit alors dans la zone protégée supprime pratiquement l'effet sur la température (tableau 7) et les brise-vent denses établis pour protéger les cultures contre le refroidissement causé par le mistral sont de ce fait inopérants.

Cependant, un inconvénient beaucoup plus grave pour les primeurs est l'accroissement du risque de gelée. Par vent faible, la stagnation de l'air dans la zone protégée a pour effet de favoriser l'élévation de la température pendant la journée mais également de produire un plus grand refroidissement pendant la nuit. L'abaissement de température peut atteindre dans certains cas 2 à 3°C.

Il faut noter également que l'élévation de température dans la journée, favorable au printemps, peut être préjudiciable en été et empêcher toute culture dans la région abritée.

Enfin, ces brise-vent très rapprochés (ce qui occasionne une perte de terrain non négligeable) et orientés est-ouest, (photo 1) [1] ombragent une superficie importante. Au printemps, le soleil étant bas sur l'horizon la bande de terrain intéressée atteint environ 2 fois la hauteur du rideau, ce qui correspond, pour des brise-vent espacés de 10 fois leur hauteur, à une zone représentant 20 p. 100 de la surface cultivée. Cet effet est d'autant plus néfaste en cette saison que les cultures protégées sont des primeurs.

(1)Cette photographie comme les photos suivantes 2 et 3 sont publiées grâce à l'aimable autorisation de l'I. G. N. (Institut Géographique National).

Cyprès de Lambert (*Cupressus macrocarpa Lambertiana*). Il donne des rideaux de même type que le cyprès pyramidal, mais il est moins indifférent au sol et plus exigeant et surtout il est plus sensible aux gelées.

Cyprès horizontal (*Cupressus sempervirens horizontalis*). Il présente les mêmes caractères de rusticité que le cyprès pyramidal tout en donnant des rideaux plus perméables. Cependant, il est difficile de s'en procurer des graines pures car il s'hybride fréquemment avec le cyprès pyramidal.

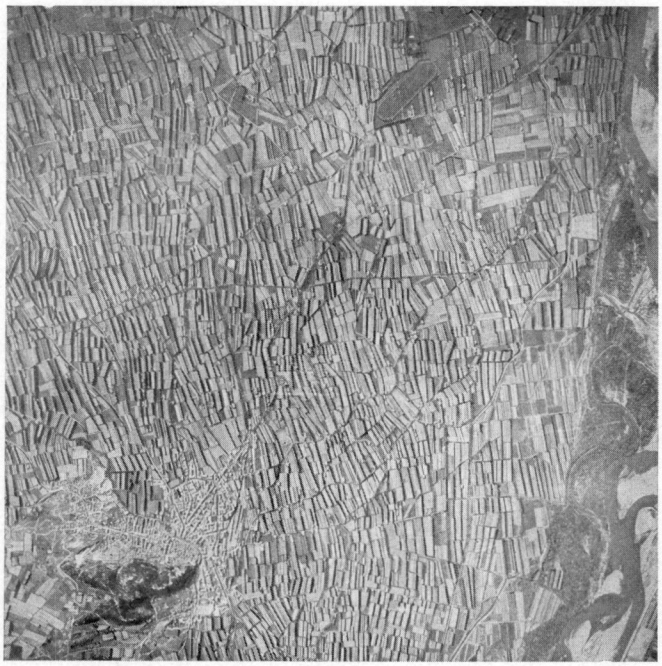


PHOTO 1. — *Brise-vent dans la région de Cavaillon.* (Photo I. G. N.)

Le cyprès horizontal planté en une seule rangée avec un espacement sur la ligne de 0,70 m est utilisé dans le cas de maraîchage de plein champ.

Ces brise-vent, un peu plus perméables que ceux de cyprès pyramidaux, présentent des inconvénients moins marqués.

B — *Le Thuya.* — Il constitue des rideaux imperméables.

L'espèce utilisée est le *thuya gigantea,* arbre très rustique mais demandant une certaine humidité atmosphérique. Il exige des sols poreux profonds et frais mais il est indifférent à leur composition minérale.

Il n'est presque plus utilisé à cause de la lenteur de sa croissance.

C — *Le Biota* (*Biota orientalis*). — Il présente les mêmes avantages et les mêmes défauts que le thuya mais en plus il se dénude à la base.

6.1.1.2 — *Le peuplier.*

C'est pratiquement la seule essence à feuilles caduques utilisée comme brise-vent. Sa croissance rapide, sa facilité de reproduction par bouturage, expliquent qu'il soit déjà beaucoup utilisé sur sols humides et particulièrement en Camargue.

Il constitue des rideaux perméables de bonne efficacité surtout employés dans la protection des vergers.

6.1.1.3. — *La Canne de Provence (Arundo donax).*

On la trouve dans les terrains humides ou le long des canaux d'irrigation où elle constitue bien souvent des rideaux imperméables car on la laisse pousser en touffes trop denses.

6.1.1.4. — *Autres espèces.*

On citera pour mémoire quelques espèces très peu employées comme le laurier-sauce, le sureau, le tamaris, le maïs, le seigle, etc.

6.1.1.5. — *Les haies mortes ou « cannis ».*

On distingue deux types : celui d'Avignon et celui de Cavaillon. Le premier est constitué de cannes ligaturées par du fil de fer, de manière à former une barrière dense d'environ 2 m de haut. Il présente tous les inconvénients d'un brise-vent imperméable. Le second se compose de cannes fichées en terre, côte à côte, laissant entre elles un espace égal à deux fois leur diamètre et formant ainsi un ensemble perméable.

En conclusion, on constate que les brise-vent tels qu'ils sont actuellement conçus dans le midi de la France, présentent une efficacité certaine dans la lutte contre les effets mécaniques du vent, ce qui justifie leur emploi exclusif pour la protection de certaines cultures très délicates (Lorch 1958). Cependant, pour pallier certains inconvénients (action néfaste sur le microclimat, encombrement et prix de revient élevé), on peut se demander s'il n'existe pas de meilleures solutions.

6.1.2. — *Quelques suggestions*

Le problème qui se pose est donc de trouver des brise-vent qui tout en ayant une certaine efficacité dans la réduction du vent, permettent de modifier favorablement le microclimat et laissent un plus grand espacement entre les rideaux successifs. (photo 2).

De Boixo (1960) a proposé pour pouvoir espacer les rideaux, d'augmenter leur hauteur. C'est ainsi qu'il préconise l'emploi en Afrique du Nord de haies de cyprès de 20 m de haut, espacées de 160 m. Mais étant donnée la croissance relativement lente de ces arbres, il faudra attendre de nombreuses années avant que la protection soit satisfaisante.

La solution la meilleure semble donc être l'emploi de rideaux semi-perméables. En effet, on a vu que l'espacement optimal entre deux rideaux successifs est dans ce cas de 20 à 25 fois leur hauteur (chapitre 1) au lieu de 10 fois pour les brise-vent imperméables. Ainsi, en employant des rideaux de même hauteur que

ceux utilisés actuellement, il serait possible d'en supprimer 2 sur 3 (espacement moyen 30 m) ce qui permettrait un gain de terrain et une facilité accrue de travail du sol.

De plus, il faut rappeler que les brise-vent semi-perméables dans les régions méridionales ont un effet bénéfique sur la végétation lié aux conditions d'évapotranspiration : ils abaissent la température de l'air pendant la saison chaude et ils l'élèvent en hiver et au printemps ; le risque de gelée est diminué par rapport à des rideaux imperméables et surtout l'efficacité de l'eau d'irrigation est augmentée.

Mais comment constituer des brise-vent semi-perméables tout en tenant compte des exigences particulières à chaque culture ?

PHOTO 2. — *Brise-vent espacés dans la Mitidja, près de Boufarik (Algérie)* (Photo I. G. N.)

Pour les cultures maraîchères, il est nécessaire d'avoir une protection suffisante dès la fin de l'hiver. Aussi, les seules espèces utilisables sont les conifères. Parmi ceux-ci, il n'y a que le cyprès horizontal (et le cyprès de l'Arizona qui lui ressemble beaucoup) qui peuvent donner des rideaux semi-perméables (tableau 19). L'espacement recommandé pour les plants est de 2 m sur la ligne.

Pour les cultures moins précoces, il est possible d'utiliser d'autres brise-vent et tout d'abord les rideaux de cannes de Provence (vivantes) réduits à une faible épaisseur.

On peut de même utiliser des rideaux de seigle (dont la montaison est précoce) constitués par le semis d'une bande de 0,80 m de large, ou encore quelques rangées de maïs (4 au maximum).

TABLEAU 19

Efficacité comparée de deux brise-vent, l'un de cyprès pyramidaux (dense) et l'autre de cyprès horizontaux (semi-perméable) (d'après NÄGELI, 1957)

Type	Réduction de la vitesse du vent en % derrière les haies de cyprès				
	Zone ouverte	Distance derrière le brise-vent			
		1,7 × h	3,3 × h	5,0 × h	6,7 × h
Cyprès pyramidal.....	100	32	52	75	89
Cyprès horizontal.....	100	62	49	47	54

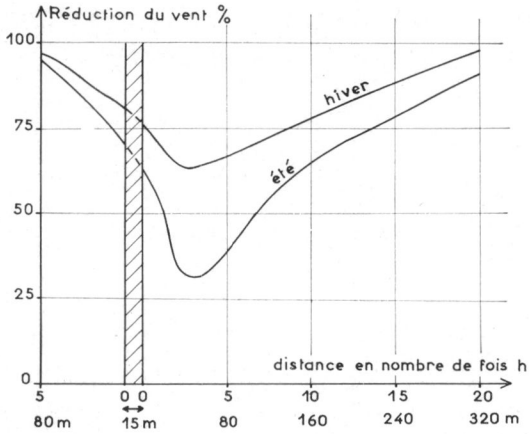


FIG. 20 — *Variation de l'effet protecteur d'un brise-vent composé de feuillus, suivant la saison* (d'après NÄGELI)

Enfin, dans tous les cas, on peut utiliser les cannis à la condition que les cannes soient espacées d'une distance égale à leur diamètre.

L'écartement entre les rideaux doit être de 20 fois leur hauteur ou de 15 fois dans certains cas particuliers pour obtenir une protection accrue, mais ne doit jamais être inférieur.

Pour les cultures fruitières, l'emploi de rideaux de feuillus est à conseiller. La diminution de leur effet protecteur en hiver (fig. 20) ne présente pas d'inconvénient et même, le rideau étant très perméable en début de saison, le risque de gelées printanières n'est pas augmenté. La principale essence utilisable est le peuplier dont la croissance est très rapide. La variété *Robusta* et les hybrides italiens sont les plus employés actuellement et ils sont plantés en une seule rangée étant branchus jusqu'à leur base. L'espacement entre les rideaux successifs peut être de 100 m dès leur implantation et lorsqu'ils atteignent 10 m de haut, il est alors possible d'abattre un rideau sur deux.

On peut également utiliser les cyprès horizontaux pour protéger les cultures fruitières, mais leur croissance est beaucoup moins rapide. C'est ainsi qu'à 1 an, le cyprès mesure 0,50 m et le peuplier 1,50 m et qu'à 3 ans, ils mesurent respectivement 1,50 et 5 m.

Naturellement, toutes ces considérations s'appuyant sur les travaux effectués à l'étranger et sur des études théoriques demandent à être vérifiées sur le terrain afin de préciser un certain nombre de points :

— Espacement optimal des différents plants d'un rideau de manière à obtenir un brise-vent semi-perméable ;

— effet microclimatique de ces brise-vent : température de l'air et du sol et surtout influence sur l'évapotranspiration ;

— influence sur le rendement et sur l'utilisation de l'eau par la plante.

D'autre part, on pourrait envisager pour constituer les brise-vent, l'introduction de nouvelles espèces :

— le bambou à condition de limiter l'extension latérale des touffes,

— le tamaris en terrain salé malgré une croissance assez lente,

— l'eucalyptus, très employé en Italie, dont la plasticité (KARSCHON 1956) permet d'espérer la sélection de variétés adaptées aux conditions climatiques du Midi.

6.2. — LA SUPPRESSION DES TALUS BOISÉS DANS LES PAYS DE BOCAGE

6.2.1. — *Caractères généraux des pays de bocage de l'ouest de la France*

Les pays de bocage de l'ouest de la France présentent un certain nombre de caractères communs (MARION 1960).

1°) Présence sur un relief assez mou, de sols argileux plus ou moins imperméables.

2°) Climat largement ouvert aux influences atlantiques à pluviosité plus ou moins élevée et à humidité atmosphérique relativement forte et constante, entraînant la nécessité d'assainir les terres.

3°) Habitat dispersé avec prédominance de la petite propriété obligeant les agriculteurs à produire le bois nécessaire à leurs besoins sur l'exploitation même. C'est pourquoi ces pays apparaissent entièrement cloisonnés par des talus boisés (photo 3).

6.2.2. - *Rôle des talus boisés*

Les talus boisés jouent un rôle multiple.

— *Ils fournissent le bois nécessaire à la ferme.* C'est pour cette raison qu'ils furent établis mais actuellement leur présence n'est plus justifiée par un tel usage.

— *Ils permettent l'assainissement des terres.* En effet, les arbres créent un appel d'eau vers la périphérie des champs et de plus, les chemins creux jouent le rôle de collecteurs de drainage.

— *Ils forment les mailles d'un réseau de brise-vent.*

6.2.3. — *Conséquences de la suppression des talus boisés*

Les haies et les talus s'étendent bien souvent de façon anarchique et empêchent le travail mécanique des champs (photo 3). D'autre part, ces cultures forestières autour des prairies ne sont plus rentables et les chemins creux circulant entre les diffé-

rentes parcelles ainsi délimitées se sont, dans beaucoup de cas, transformés en ronciers abritant une flore et une faune nuisibles aux cultures. C'est pour toutes ces raisons, auxquelles il faut ajouter la nécessité du remembrement, que l'on abat les haies et que l'on supprime les talus.

Dans ces régions, la principale ressource de l'agriculture est l'exploitation des prairies, pour l'élevage. Les haies, qui constituent des brise-vent semi-perméables, créent, comme on l'a vu, un microclimat favorable au développement de l'herbe. La suppression des talus boisés risque de créer un climat moins favorable à la production fourragère. Mais également l'arasement des talus a pour effet de réduire le drainage naturel du sol et c'est ainsi que des terres saines sont devenues mouilleuses (MARION 1960).

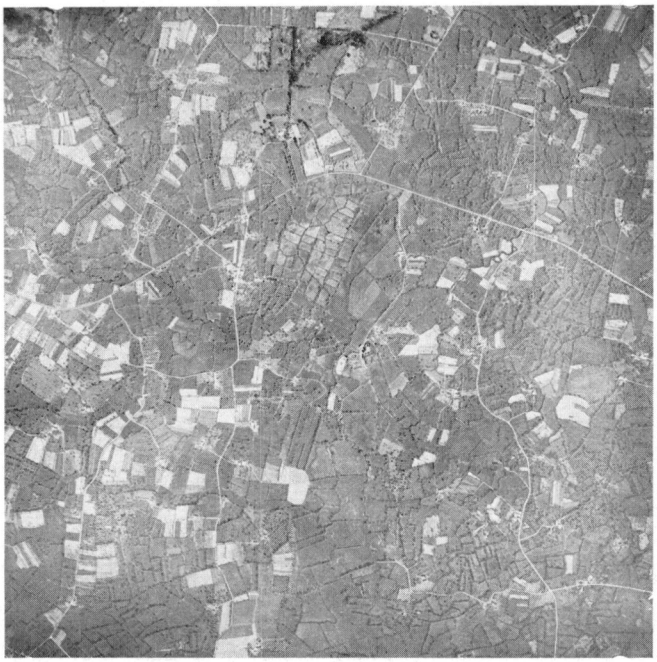


PHOTO 3. — *Le bocage normand près du mont Saint-Michel* (Photo I. G. N.)

6.2.4. — *Quelques suggestions*

Il est certainement possible d'atteindre la production maximale en conciliant les différents aspects du problème.

Les talus boisés, tels qu'ils sont conçus actuellement, empêchent tout progrès de l'agriculture et il est nécessaire de transformer les bocages de l'Ouest. Cependant, la suppression systématique de haies n'est pas à envisager, comme le prouvent d'ailleurs certaines expériences malheureuses.

Il est donc nécessaire de conserver une partie des talus existants de manière à constituer un réseau de brise-vent judicieusement répartis et orientés. L'écar-

tement entre les rideaux successifs devrait être de 20 à 25 fois leur hauteur ce qui permettrait d'avoir des parcelles suffisamment larges pour ne pas entraver la mécanisation (250 m pour des rideaux de 10 m de haut).

6.3. — Les plaines du Nord et de la région parisienne

L'idée d'implanter des brise-vent en Beauce peut paraître « saugrenue » au premier abord. Mais les expériences effectuées par Bouchet et de Parcevaux (1962) au cours de l'été 1962, montrent clairement que l'implantation de rideaux protecteurs dans ces régions serait susceptible d'entraîner une augmentation sensible du rendement (tableau 17) (augmentation prévisible d'ailleurs, ces régions ayant un climat subhumide).

Mais une question se pose alors : comment constituer les brise-vent ? La mécanisation des cultures exige que la distance séparant les rideaux successifs soit la plus grande possible. Il est donc nécessaire d'employer des essences à croissance rapide et donnant des brise-vent semi-perméables. Le peuplier semble répondre parfaitement à ces conditions. On peut utiliser la variété *Robusta* ou les hybrides italiens plantés en une seule rangée comme dans le Midi, mais également des hybrides américains à la condition de leur associer des essences de remplissage (aune, charme, orme, platane...). On peut aussi par la suite étêter quelques peupliers par alternance pour qu'ils deviennent des têtards et renforcent l'écran (F. A. O. 1956).

L'espacement de tels rideaux est de 20 à 25 fois leur hauteur ce qui correspond pour des peupliers de 20 m de haut à un écartement de 400 à 500 m.

D'autre part, on peut semer à l'intérieur d'une culture basse (betterave, pomme de terre) des lignes de plantes telles que le maïs ou le chanvre, de manière à avoir des rideaux semi-perméables.

Par exemple, il suffirait de remplacer deux lignes de betteraves par 2 à 3 rangs de maïs tous les 40 m pour obtenir une protection suffisante à la condition que les rideaux soient orientés face aux vents dominants. Dans ces conditions, le travail mécanique des champs ne serait pas entravé et de plus le terrain occupé par les cultures protectrices ne serait pas perdu puisqu'il produirait une certaine quantité de grains ou de fibres.

On peut remarquer que cette dernière proposition n'est qu'un cas particulier du problème des cultures associées (Baldy 1963). Actuellement, ce mode de mise en valeur n'est pas conseillé (Boulay, 1953 ; Maume et Dulac, 1946), mais ce problème n'a jamais été étudié à fond et il est possible qu'il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine.

Enfin, il est évident que le problème français des brise-vent ne se limite pas à ces trois exemples. De nombreuses régions françaises sont intéressées par cette question comme le laisse prévoir l'étude théorique.

Reçu pour publication en février 1963.

SUMMARY

WINDBREAKS. MODIFICATION OF THE MICROCLIMATES AND IMPROVEMENT IN AGRICULTURAL PRODUCTION

An attempt is made at a summary review of results published in the literature on the multiple and sometimes contradictory effects of windbreaks :

— effect on wind and on microclimate (thermal balance, temperature, water balance, carbo-dioxide concentration, etc.),

— effect on soil conservation and on crops production.

With a view to increasing agricultural production through influencing the climate, improvements in the existing windbreaks are suggested, and the problem of their installation, in regions in which little attention has so far been paid to them, is discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE WINDSCHUTZES-VERANDERUNGEN DES MIKRO-KLIMAS UND VERBESSERUNG DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN PRODUKTION

Der Verfasser bemühte sich, die gesamten, in der Bibliographie verschiedenen Resultate über die vielfältigen und sich manchmal widersprechenden Einflüsse des Windschutzes zusammenzustellen :

— Einfluss auf den Wind, und mithin auf die verschiedenen Mikroklimas (Wärmebilanz, Temperatur, Wasserbilanz, Gehalt an Kohlendioxyd usw).

— Einfluss auf die Erhaltung des Bodens und somit auf die landwirtschaftliche Produktion.

Im Zuge der Verbesserung dieser Produktion durch Beeinflüssung des Klimas erwähnt der Verfasser die möglichen Verbesserungen des schon bestehenden Windschutzes und stellt das Problem seiner Anwendung in Gegenden, wo die Notwendigkeit dieser Technik nicht ins Auge stach.

РЕЗЮМЕ

Ветроломные полосы.

Изменение микроклиматов и улучшение сельскохозяйственной продукции.

Г. ГЮИЙО (Центральная Станция Биоклиматологии. Национальный Центр Сельскохозяйственных Изследований.

Автор пробует соединить в целое общие результаты сведений приведенных в литературе о многочисленных и иногда противоречивых влияниях наблюдавшихся при употреблении ветроломных полос.

— Влияние на ветер — и, следовательно, на микроклимат (тепловой баланс, температура, баланс влажности, количество углекислоты и т. д.);

— Влияние на сохранение почвы и, в конечном итоге на растительную продукцию.

В поисках возможности мелиорации сельскохозяственной продукции при помощи влияния на климат, автор разсматривает необходимые улучшения уже существующих ветровых полос и ставит вопрос об их установке в районах в которых интерес этого технического приема еще не очевиден.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALISSOW B. P., DROSDOW O. A., RUBINSTEIN E. S., 1956. *Lehrbuch der Klimatologie*, Berlin.

ASLYNG H. C., 1958. Shelter and its effect on climate and water balance. *Oikos*, **9**, 282-302.

BALTAXE R., 1961. The verticale profile of wind speed near the ground as a criterion of turbulence in relation to shelter. *C. R.* 13e *Congrès Union Internationale des Instituts de Recherche forestière*, Vienne.

BASOV G. P., 1948. (Résultat de 50 années d'études sur le rôle hydrologique des forêts dans la steppe de pierre.) (R.) *Potchvovédénié*, nº 8, 475-484.

BATES C. G., 1911. Windbreaks : their influence and value. *Bulletin of U. S. Forestry Service*, nº 86.

BATES C. G., 1944. The windbreak as a Farm Asset. *Farmers' Bulletin, U. S. Department of Agriculture*, nº 1405.

BAUMGARTNER A., 1961. Baum und wald im windfeld. *Allgemeine Forstzeitschrift*, nº 13-14.

BERG L., 1941. *Les régions naturelles de l'U. R. S. S.* Paris, Payot.

BERNARD E., 1945. *Le climat écologique de la cuvette centrale congolaise.* INEAC, Bruxelles, chap. VII. Les précipitations, 125-181.

BLENK H., 1952. Das Windschutzproblem, umschaudienst der Akademie für Rammforschung und Landesplanung, Hanover, nº 5-6, 170-235.

BLENK H., TRIENES H., 1956. Strömungstechnische Beiträge zum Windschutz. *Zeitschrift Grundlangen der Landtechnik*, nº 8, I et II. Düsseldorf.

BODEUX A., 1956. De l'utilité en Campine de rideaux abris contre le vent. *Bull. Soc. R. forest. Belgique*, 463-476.

BODROV V. A., 1935. Influence of shelterbelts on microclimate of adjoining territory. *Translation U. S. Forestry Service*, nº 164.

BODROV V. A., 1936. The influence of shelterbelts over the microclimate of adjacent territories. *J. Forestry*, nº 34, 696-97.

de BOIXO P., 1960. De la protection des cultures contre les dégâts du vent. *C. R. Acad. Agric.*, **46** 585-96.

BORDAS J., 1946. *in* Essai d'agronomie méditerranéenne, 191-192. *Imprimerie Rullière Frères, éditeur Avignon.*

BOUCHET R. J., 1961. Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 1, 51-64.

BOUCHET R. J., 1962. L'évapotranspiration potentielle. Sa mesure ou son estimation à partir de l'évaporation sous abri. Signification et intérêt écologique. *Recherches sur la zone aride : Actes du colloque de Montpellier* (à paraître). *U.N.E.S.C.O.*

BOUCHET R. J. de PARCEVAUX S., 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'évapotranspiration potentielle au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 686-694.

BOULAY H., 1953. Un aspect de la production horticole du Roussillon : les cultures associées. *B. T. I.*, nº 79, 333-341.

BURNACKIJ D. P., ROZHANSKAJA O. D., 1953. (Influence des bandes forestières protectrices sur le microclimat). (R.) *Recueil des travaux de physique agronomique.* Académie des Sciences Lénine, **6**, 57-91.

CABORN J. M., 1956. Width and cross sectional profile in shelterbelts. 12e *Congrès, Union internationale des instituts de recherches forestières*, Oxford, Londres, 5-11.

CABORN J. M., 1957. Shelterbelts and Microclimate. *Forestry Commission Bulletin* nº 29.

CALUIANU R., VALUTA E., PUPULESCU F., BENDE E., 1959. (Résultats ayant trait à l'effet des jeunes écrans brise-vent sur les principales cultures agricoles du Baragan et de la Dobrogea). (Ro, f) *Anal. Inst. Cercet. Agron.*, Ser. A, **27**, 157-170.

CASTELLANI E., PREVOSTO M., 1961. Experimental contributions on the study concerning the relation between poplars grown on fields' borders and some agricultural crops. *C. R.* 13e *Congrès Inst. Recher. Forest.* Vienne, 11-18.

CATRINA I., MARCU G. H., 1955. (Contribution à l'étude des écrans forestiers et de leur influence sur l'humidité du sol du champ avoisinant). (Ro.) *Bull. stiint, Sect. Biol. Stiinte agric.*, **7**, 1011-1026.

CHAMPION H. G., 1958. Shelterbelts and their effects. *Union internationale des instituts de recherches forestières*, 12e *Congres, Oxford*, 1956, **1**, 1-4.

CHAROV J. A., 1949. (Au sujet de la transformation de l'Agro-climat.) (R.) *Doklady Useoïouznoï Akademii selsko koziaïstvennykh Naouk imeni Lenina* (Compte rendu de l'Académie d'Agriculture Lénine), nº 6, 78-80.

COLBRANT M. P., 1962. Principaux parasites des haies brise-vent en Provence. *Congrès pomologique, Avignon*, 56-71.

Compagnie Nationale d'Aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc. 1961. *Les abris et les coupe-vent.*

LA COUR P., 1872. Skovencs Indflydelse paa Varmen. *Zeitschrift der Osterreich Ges. F. Meteorol.*, **7**, 254-256.

DALGAS C., 1939. *Forschungen über den Einfluss der Pflanzemgen in Dänemark.* Copenhague 1936. (Référence dans : Bioklimatische Beiblätter zur Meteorologische Zeitschrift, nº 6, 1939, p. 96).

DENUYL D., 1936. Zone of effective windbreak influence. *J. Forestry,* nº 34, 689-95.

DIRMHIRN I., 1953. Zur Strahlungsverminderung an Windschutzstreifen. *Wetter und Leben.,* Wien, **5**, 208-213.

DOKOUTCHAEV V. V., 1892. *Nos steppes jadis et maintenant.* St-Petersbourg.

VAN EIMERN J., 1956. Bemerkungen über die Veränderlichkeit des Schutzeffektes von Windschutzstreifen. *Die Holzzucht,* nº 3.

VAN EIMERN J., 1957. Über die Veränderlichkeit der Windschutzwirkung einer. Doppel Baumreihe bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen. *Berichte Deutscher Wetterdienst.,* nº 2, 193-210.

VAN EIMERN J., 1960. Die Bodenabtragung durch den Wind. *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch,* **37**, 488-508.

F. A. O., 1956. *Les peupliers dans la production du bois et l'utilisation des terres.* La populiculture d'alignement, p. 147-158.

FOURNIER d'ALBE E. M., 1958. La modification des microclimats. *U.N.E.S.C.O. Recherches sur la zone aride* X *: Climatologie. Compte rendu de recherches,* 140-162.

GEIGER R., 1931. Wald und Windschutz. *Forstwissenchaft Zentralblatt,* nº 53, 760-762.

GEIGER R., 1958. The modification of microclimate by vegetation in open country and in hilly contry. *U.N.E.S.C.O. Recherches sur la zone aride* XI *: Climatologie et microclimatologie. Actes du colloque de Canberra* 255-258.

GEIGER R., 1961. Das Klima der bodennähen Luftschicht Abschnitt VII 853. *Der Künstliche Windschutz,* 518-534, IVe éd.

GEORGE Ed., READ R. A., JOHNSON Ew., FERBER A. E., 1957. Shelterbelts and windbreaks. *Soil, Yearbook of agriculture,* U. S. Departement of agriculture, 715-722.

GIULIANI R., SAVI L., 1951. Frangiventi e rimboschimento nella bonifica di Arborea. Monti e boschi, **2**, 11-12.

GOELLNER A., 1962. L'efficacité des abris coupe-vent. *Bas-Rhône Languedoc,* nº 9, mai-juin.

HALL N., RUSSEL U. S., HAMILTON C. D., 1958. Trees and microclimate. *U.N.E.S.C.O. Recherches sur la zone aride* XI *: Climatologie et microclimatologie. Actes du colloque de Canberra,* 259-264.

HALLAIRE M., 1961. Irrigation et utilisation des réserves naturelles. *Ann. agron.,* **12**, 1, 87-98.

HALLAIRE M., 1962. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de desséchement. *C. R. Acad. Sci.,* **254**, 2047-49.

HANKE E., KAISER H., 1954. Untersuchungen über den Einfluss eines Künstlichen Windschutzstreifen auf den Ertrag von Zuckerrüben im Jahre 1954. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau,* **102**, 81-100.

HANKE E., KAISER H., 1957. Untersuchungen über die Auswirkungen von Windschutzstreifen auf den Ertrag von Hafer, Hafer-Gerste-Gemisch und Zuckerrüben im Jahre 1955. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau,* **103**, 90-110.

HENIN S., 1950. L'érosion éolienne. *B. T. I.,* nº 51, 509-516.

HENIN S., 1960. Problème de l'érosion en France. Érosion par le vent et par l'eau. *Techniques agricoles,* **1**, 1380- (7 pages)

HENNEBO D., ILLNER K., 1953. Strömungs bedingte Erscheinungen Windschutz. Pflanzungen und ihre Landwirtschafliche Bedeutung. *Dtsch. Landw. Berlin,* **4** (11), 603-607.

JAWORSKI J., 1961. Potential évaporation in areas sheltered with wind-breaks and in open areas. *Ekologia Polska,* Seria A, **9**, nº 10, 165-182.

JENSEN M., 1954. *Shelter eflect. Investigations into the aerodynamics of shelter and its effects on climate and crops.* Copenhagen 1954.

KAGANOV M. A., RJABOVA E. P., 1953.(R) (Balance thermique des champs situés entre les bandes forestières). *Recueils des travaux de physique agronomique.* Académie des Sciences Lénine, **6**, 96-105.

KAISER H., 1959. Beiträge zum problem der Luftbewegung in Windschutzsystemen. *Meteor Kundschau.,* **12**, 80-87.

KAISER H., 1960. Untersuchungen über die Auswirkungen von Windschutzstreifen auf das Bodenklima. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau,* **111**, nº 1, 47-72.

KARSCHON R., 1956. Protection des cultures et des sols. Les eucalyptus et la protection des cultures agricoles. *Conférence mondiale des eucalyptus. F. A. O. Rome,* FO/56/E6bs.

KARSCHON R., 1958. *Pennisetum purpureum* comme brise-vent. *Union internationale des Instituts de recherches forestières,* 12e *Congrès, Oxford,* 1956, 36-43.

KARSCHON R., HETH D., 1958. Wind speed, windborne salt and agricultural crops as affected by wind breaks. *La yaaran,* **8**, nº 3-4, 8-13, 38-42.

KASHIYAMA T., 1958. Decrease of sea fog density by a model shelterbelt. *C. R.* 12e *Congrès Union internationale des Instituts de Recherches forestières,* Oxford, 1956, **1**, 48-59.

KAZAROV V. E., 1949. (Influence de la densité des herbages sur la température et l'humidité du sol.) (R) *Potchvovédénié,* nº 5, 268-275.

KHARITONOV G. A., 1949. (Les précipitations atmosphériques dans les forêts et dans la steppe ouverte, leur pénétration dans le sol). (R) *Potchvovénédié,* nº 2, 25-40.

KHVOLES S. B., CHUDNOVSKIJ A. F., 1958. Régime des radiations des champs au milieu des bandes forestières. *Recueil des travaux de physique agronomique*. Acad. des Sciences Lénine, **6**, 91-96.

KRAEJOV S. d. A., 1961). (Sur la possibilité de remédier à l' « horizon mort » d'assèchement au moyen de bandes boisées protectrices). (R) *Bjull. moskov. Obslich Ispytatel Prirody otol. biol.*, **66**, n° 2, 85-97.

KREUTZ W., 1938. Das Windschutzproblem. *Bioklim. beibl.*, n° 5, 10-16.

KREUTZ W., WALTER W., 1956. Wind und Strömungs verhältnisse im Bereich von Windschutzanlagen in Abhängigkeit vom Anblawinkel und praktische Folgerungen. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau*, **101**, 3, 279-290.

KREUTZ W., WALTER W., 1958. Windschutzwirkung in Abhängigkeit von der Breite und Durchlässigkeit des Hindernisses. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau*, **105**, 271-282.

KUZENKO A. I., 1953. Desséchement des sols de champs situés parmi les bandes forestières. *Recueil des travaux de physique agronomique*, Acad. des Sciences Lénine, **6**, 105-112.

LABOUNSKY I. M., 1949. Forêt : moyen puissant de la transformation de la nature des steppes. *Agrobiologuiia*, n° 1, 102-115.

LEVIN S. L., 1953. Influence des bandes forestières et de la couverture végétale sur l'évaporation. *Recueil des travaux de physique agronomique*, Académie des Sciences Lénine, **6**, 113-121.

VAN DER LINDE R. J., WOUNDENBERG J. P. M., 1946. A method for determining the daily variation in width of the shadow in connection with the time of the year and the orientation of the overshadowing object *Meded en Verhandelingen*, n° 52, Kon. Nederl. Met. Inst. and in Meded. N° 4 Inst. Biol. Research in Nature. Arnhem, 2 p.

VAN DER LINDE R. J., 1954. Some aspects of the problem of shelter in cultivated areas. *Union Int. des Inst. de Rech. Forest.*, 11e *Congrès, Rome*, 1953, 269-280.

LORCH J., 1958. Analysis of windbreak effects. *Bulletin of the research council of Israel*, Section D, Botany **6** (4), 211-220.

LUPE I., 1956. Influence des écrans forestiers sur les récoltes de blé et d'avoine dans le Baragan et la Dobrogea en 1952 et 1953. *Buletin Stiintifie, Sectia de Biologie si Stiinte Agricole*, **8**, 1, 190-208.

MARCU Gh., IONESCU Al., 1959. Recherches concernant l'influence de la forêt et des rideaux abri sur l'accumulation de la neige. *Revista Padurilor*, n° 1, 35-38.

MARION J., 1960. L'avenir du bocage breton. Talus boisés et brise-vent. *Cah. Ing. agron.*, n° 142, 36-42.

MARION J., 1960. Les brise-vent au Jutland. *Rev. Forest. Franç.*, n° 2, 129-141.

MAUME L., DULAC J., 1946. Influence préjudiciable d'une culture associée (vesce-avoine) sur la croissance et le mode de nutrition des arbres fruitiers. *C. R. Acad. Agric.*, **32**, 153-156.

MIASNICOV M., PLESA I., STEFAN V., 1958. Contribution à l'étude de l'évaporation dans le système des rideaux de protection dans la station I. C. A. R. « Baragan » Marculesti. *Problème agricole* (Roumanie), **10** (2) 46-50.

NÄGELI W., 1942. Importance des rideaux contre le vent pour la protection des cultures agricoles. *Journal forestier suisse*, n° 93, 1-20.

NÄGELI W., 1943. Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. *Ann. Inst. féd. Rech. forest.*, **23**, 223-276.

NÄGELI W., 1946. Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windsschutzstreifen. *Ann. Inst. féd. Rech. forest.*, **24**, 659-737.

NÄGELI W., 1953. Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Schilfrohwänden. *Ann. Inst. féd. Rech. forest.*, **29**, 213-266.

NÄGELI W., 1953. Die Windbremsung durch einen grösseren Waldkomplex. *Union int. des Instituts de Recherches forestières*, 11e *Congrès, Rome*, 240-246.

NÄGELI W., 1956. Über die Windschutzwirkung einer Allee mit astloser Bodenpartie. *C. R.* 12e *Congrès Union internationale Recherches forestières, Oxford*,

NÄGELI W., 1957. Shelterbelts and Windbreaks. *Report to the government of Israel*. F. A. O. Report n° 586.

NÄGELI W., 1961. Der Einfluss von zerstreut wachsenden Bäumen und Baumgruppen auf die windverhältnisse von Wiedeland. *C. R.* 13e *Congrès de l'Union internationale des Instituts de recherche forestière, Vienne*,

NICOTA B., 1956. Influence des rideaux abris sur l'amélioration de la température de l'air et du sol dans l'intervalle de ces rideaux. *Union Internationale des Instituts de recherche forestière*, 12e *Congrès, Oxford*, 15-35.

NICOTA B., 1961. Les modifications de la température de l'air dans l'intervalle de 2 rideaux abris à Ovce Pole. *C. R.* 13e *Congrès Union internationale des Instituts de recherche forestière, Vienne*,

NICOTA B., 1961. Influence des jeunes rideaux abris dans l'intervalle printemps-été sur l'humidité dans le sol et sur l'augmentation de recette de la récolte. *C. R.* 13e *Congrès Union Internationale des Instituts de Recherche forestière, section* 11, *Vienne*,

Organisation Météorologique Mondiale, 1962. Effects of windbreaks and shelterbelts. Report of a working group of the commission for Agricultural Meteorology prepared by E. Van Eimern, 1962.

PANFILOV JA. D., 1936. Experiments and Research of All. *Union Research Institute for agri-Forestry Amelioration and Forest Management*, n° 6 (Shelterbelts), State tech. Printing Office. Moscou.

PANFILOV JA. D., 1954. Sur l'aménagement des plantations forestières pour la protection des cultures *Agrobiologuiia*, **1**, 113-126.

de PARCEVAUX S., 1961. Test physiologique permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes. *Ann. agron.*, **12**, 1, 75-80.

de PARCEVAUX S., 1962. Une méthode de mesure sur le terrain de la transpiration végétale. *Recherches sur la zone aride. Actes du colloque de Montpellier* (à paraître). *U.N.E.S.C.O.*

REBOUR M., 1950. Abris. Brise-vent. Les agrumes. *Union des syndicats de producteurs d'Algérie*, Alger, 151-154.

REBOUR M., 1957. La protection des cultures contre le vent. *Arboriculture fruitière*, nº 39, 14-15.

VAN RHEE J. A., 1957. The cropping of fruit trees in relation to windbreak protection. *Instituut voor toegepast biologisch onderzoek in de Natuur* (ITBON) Arnhem, nº 33, 11-17.

VAN RHEE J. A., 1959. Wind protection of agricultural crops especially studied on fruit. *Instituut voor toegepast biologisch onderzoek in de Natuur* (ITBON) Arnhem, nº 43.

VAN RHEE J. A., 1961. Windschutz im Obstbau. *Der Erwerbsobstbau*, **3** (9), 171-174.

RUSCH J. D., 1955. Der CO_2 Gehalt bodennäher Luftschichten unter Einfluss des Windschutzes. *Zeitschrift für Pflanzenernährung*, nº 71, 113-132.

SHAH, SYED RIAZ HUSSAIN, 1962. Studies on wind protection. *Instituut voor toegepast biologisch onderzoek in de Natuur (ITBON). Arnhem, Netherlands*, nº 60, 113 p.

SOEGAARD B., 1954. Outline of shelterbelts and shelterbelt test in Denmark. *Union Int. Inst. Rech. For. 11e Congrès Rome*, 1956, 246-260.

SOZYKINE M. F., 1948. Le rôle de la forêt dans le réchauffement des territoires. *Sovietskaïa Agronomia*, nº 8, 30-42.

STAPLE W. J., LEHANE J. J., 1955. The influence of field shelterbelts on wind velocity, évaporation, soil moisture and crop yield. *Canad. J. Agric. Sci.*, **35** (5), 440-453.

STEUBING L., 1952. Der Tau und seine Beeinflüssung durch Windschutzanlagen. *Biologische Zentralblatt*, **71** (5-6), 282-313.

STEUBING L., 1952-53. Experimentelle Untersuchungen über die Veränderung der Standortsfaktoren durch Windschutzanlagen. *Oikos*, **4** (11), 118-147.

STEUBING L., 1950. Wurzeluntersuchungen an Feldschutzhecken. *Zeitschrift für Acker-und Pflanzenbau* **110** (3), 332-341.

STOCKER O., 1956. Die Abhängigkeit der Transpiration von den Umweltfaktoren. *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, **3**, 436-388.

TAMATE S., 1956. Effect of windbreaks on the decrease of salt content in seawind. *C. R. 12e Congrès Union International des Instituts de recherche forestière*. Oxford.

TAMATE S., 1956. Influence of windbreak on evaporation. *C. R. 12e Congrès Union Int. Inst. Rech. For., Oxford*, 45-46.

TAMM E., KRZYCH G., 1961. Zum Verlauf des CO_2 Gehaltes der Luft im Bereich Landwirtschaftlicher Kulturpflantzbestände. *Zeitschrift für Acker und Pflanzenbau*, **112**, 253-278, 377-398.

TKATCHENKO B., 1950. Défense contre la sécheresse et contre l'érosion dans les steppes de la Russie méridionale. *L'Agronomie tropicale*, **5**, 3-41.

TREGUBOV V., 1960. Lutte contre l'érosion éolienne. *C. R. colloque sur la conservation et la restauration des sols* (lutte contre l'érosion) Téhéran, 21 mai-11 juin 1960, 279-297.

VANHELMONT G., 1955. Étude du microclimat régnant dans un peuplement de genêts entrouvert de couloirs de plantation. *Bull. Inst. agron. Sta. Rech. Gembloux*, **23**, 90-102.

VERNET A., CHAUSSAT R., 1961. Dynamique radiculaire et alimentation en eau des végétaux. *Ann. agron.*, **12**, 1, 157-168.

WOODRUFF N. P., ZINGG A. W., 1953. Wind tunnel studies of shelterbelt models. *Journal of forestry*, 173-178.

WOODRUFF N. P., 1954. Shelterbelt and surface barrier, effects on wind velocities, Evaporation, House Heating, Snow drifting. *Agricultural Experiment station. Kansas State College of Agriculture and applied science, Manhattan, Technical Bulletin*, 77.

WOODRUFF N. P., 1956. Spacing interval for supplemental shelterbelts. *Journal of Forestry*, **54** (2), 115-122.

WOODRUFF N. P., READ R. A., CHEPIL W. S., 1959. Influence of a field windbreak on Summer wind movement and air Temperature. *Agricultural Experiment Station, Kansas State University of Agriculture and Applied Science, Manhattan. Technical bulletin* nº 100.

ZAEV T. P., 1932. Influence des bandes forestières sur la fertilité du tchernoziom ordinaire. *Potchvové dénié*, nº 5-6, 613-63.

ADDENDUM

Références se rapportant aux Annales agronomiques, Nos 4 et 5, 1963.

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, Évapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. agron.*, **14**, (5.)

BOUCHET R. J., PARCEVAUX S. de, ARNOUX J., 1963. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **14**, (5).

de PARCEVAUX S., 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche, essai d'interprétation en fonction des conditions du milieu. *Ann. agron.*, **14** (5).

Ann. agron., 1963, **14** (4), 489-534.

CULTURES ASSOCIÉES ET PRODUCTIVITÉ DE L'EAU

Ch. BALDY

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Dans l'optique d'une amélioration de la productivité de l'eau, on cherche à définir le rôle que peuvent jouer les cultures associées. Après un essai de classification de celles-ci et une étude des facteurs climatiques, édaphiques et biologiques agissant sur elles, en insistant particulièrement sur l'action de l'eau, sur les notions d'évapotranspiration potentielle et réelle et les liaisons entre celles-ci et la surface foliaire de l'ensemble cultural, on étudie des exemples pris dans la littérature et on montre enfin que les hypothèses de départ semblent valables. On en conclut que la productivité de l'eau peut être améliorée par l'association.

PLAN

I. — INTRODUCTION

II. — ESSAI DE CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ASSOCIATIONS CULTURALES

1. — Cultures associées homogènes
   1.1. Cultures herbacées
   1.2. Cultures arborées
2. — Cultures associées hétérogènes
   2.1. Arbre et liane
   2.2. Arbre et culture herbacée
3. — Associations oasiennes à deux ou trois étages de végétation
   3.1. Associations d'oasis sahariennes chaudes
   3.2. Associations d'oasis froides

III. — ANALYSE DES FACTEURS AGISSANT SUR L'ASSOCIATION

1. — Facteurs autres que l'eau
   1.1. Le complexe héliothermique et ses modifications par l'association
   1.2. Le sol

1.3. Interactions des plantes associées
2. — L'eau et l'association
2.1. Alimentation en eau du sol
2.2. Action du volume exploré par les racines sur l'alimentation de l'association
2.3. Évapotranspiration des cultures associées
2.4. Réalimentation artificielle du sol en eau

IV. — QUELQUES EXEMPLES D'ÉTUDES D'ASSOCIATIONS

1. — Associations homogènes.
2. — Associations hétérogènes.
3. — Cas des oasis.

V. — ESSAI DE SYNTHÈSE

1. — Aspects positifs de l'association.
2. — Aspects négatifs de l'association.
3. — Conclusions.

VI. — RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I. — INTRODUCTION

Dans les conditions de végétation non directement influencée par l'homme, il est très rare de rencontrer des peuplements purs. La littérature agronomique se réfère fréquemment à des pratiques associant, pour une surface unitaire donnée, deux ou plusieurs cultures. Ces méthodes sont encore en honneur dans plusieurs régions de France (Normandie, Bugey, Bresse, Grésivaudan, Béarn par exemple) ; elles datent de la plus haute antiquité, particulièrement dans les pays chauds, tropicaux et équatoriaux. Cette pratique des cultures associées, citée déjà dans HOMÈRE et ESCHYLE (oliviers-céréales particulièrement), est extrêmement fréquente de nos jours encore aux Indes et sur le pourtour du Bassin méditerranéen, aussi bien qu'en Afrique et en Amérique tropicales où ces méthodes peuvent même être considérées comme des normes culturales (par exemple, manioc-bananier). L'association est la règle presque absolue dans les oasis.

Dans les pays tempérés, ces pratiques revêtaient des formes différentes. En dehors des pré-vergers de Normandie et de certaines régions d'Angleterre, des vignobles cultivés de Bresse et des bocages (qui sont plutôt des brise-vent) (1), on rencontrait beaucoup d'associations du type méteil (blé + orge, blé + seigle), des prairies et des mélanges fourragers (vesce-avoine).

De nos jours, c'est à ce dernier type d'association qu'on songe le plus fréquemment, mais d'autres sont aussi à ranger dans les associations culturales comme par

(1) Cf. mémoire de G. GUYOT.

exemple : les vergers avec intercalaires d'une autre espèce, d'une autre variété, ou plantés sur un autre porte-greffe pour en modifier la vigueur (pommiers-poiriers, orangers-clémentiniers).

On rencontre un grand nombre de méthodes quand on entreprend l'étude de ces modes de culture.

Des systèmes culturaux spéciaux doivent aussi y être rangés : les bocages aussi bien que les haies de cyprès (Provence) ou de peupliers (Italie, Syrie) et les arbres de couverture des plantations de caféiers, représentent des types particuliers de cultures associées.

Les cultures d'engrais verts dans les vergers et les vignobles, de plus en plus fréquentes et nécessaires pour maintenir un taux de matière organique satisfaisant représentent aussi des associations culturales ; si ces engrais verts ne sont pas vendus, ils permettent d'économiser l'achat (souvent impossible) d'une masse de matière organique équivalente.

Enfin, les méthodes dites de non-culture (cf. note p. 494) dans les vergers et les pratiques antiérosives (bandes de cultures et de prairies alternées, en courbes de niveau ; plantes de couverture des sols tropicaux et des régions à forte pente et érosion intense) sont bel et bien, elles aussi, des associations culturales car les praticiens se sont rendus compte que la végétation spontanée convient mal en général et qu'il faut la choisir, la semer et la cultiver (fauches, fumures appropriées).

Il nous a paru nécessaire de tenter une classification des diverses cultures associées en tenant compte uniquement des interactions des divers composants les uns sur les autres, afin de faire ressortir les similitudes de situation. Nous analyserons ensuite les multiples interactions agissant sur l'association. Nous étudierons brièvement celles qui relèvent du climat lumineux et thermique, du sol et de la physiologie, non que ces problèmes soient secondaires, mais parce que nous insisterons plutôt sur l'alimentation en eau des cultures associées et la justification économique de celles-ci. Puis nous verrons quelques résultats cités dans la littérature, l'interprétation qu'on peut en donner et quels enseignements en tirer.

Ces interprétations sont bien entendu à vérifier expérimentalement.

Nous tenterons enfin d'effectuer une synthèse et de voir les conditions dans lesquelles les associations culturales peuvent permettre une meilleure utilisation des potentialités naturelles en fonction des exigences de la culture moderne.

Nous avons limité le plus possible les références bibliographiques en cours d'article. La littérature citée se rapporte évidemment au seul sujet traité. Un astérisque indique les articles fondamentaux.

II. — ESSAI DE CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ASSOCIATIONS CULTURALES

Nous avons déjà souligné la variété de celles-ci et vu qu'elles sont souvent considérées comme des entités différentes.

Nous voudrions faire sentir combien par exemple la distinction entre culture associée et engrais vert sous verger est artificielle, comme aussi celle qu'on fait

entre association culturale et brise-vent, bien que cette dernière apparaisse évidente à beaucoup.

C'est pourquoi nous avons choisi le plan suivant de classification dont les limites sont forcément un peu artificielles, mais qui nous a paru commode : cultures associées homogènes, hétérogènes et oasiennes.

1°) Cultures associées homogènes

Les diverses plantes présentent une taille à peu près analogue et ont généralement un type de végétation semblable. Des différences de *taille* entre les composants peuvent cependant apparaître (maïs-soja par exemple) mais la *durée de végétation* est alors la même.

1. 1. *Cultures herbacées*

Celles-ci présentent divers aspects :

Mélanges de céréales.

Ils ont été très employés autrefois sous le nom de méteil ; on avait soit des mélanges de blés ou de blé et d'orge, de blé et de seigle... Ces pratiques se rencontrent encore dans l'Europe de l'Est, et aux Indes (avec d'autres graminées céréalières).

Fourrages.

La gamme des associations fourragères proposées s'étend pour ainsi dire chaque jour. Les plus typiques sont les vesce-avoine, dactyle-luzerne, maïs-soja, etc. Ces mélanges sont récoltés soit en foin, soit en vert pour l'ensilage, de façon à fournir un maximum d'unités fourragères à l'hectare. C'est l'association la plus connue et son efficacité est généralement admise. Les prairies naturelles entrent dans cette catégorie comme les mélanges trèfle blanc-graminées ou les mélanges de graminées.

Associations tropicales.

Elles sont extrêmement nombreuses. Nous citerons par exemple : cotonnier-maïs, maïs (grain) et soja, maïs et arachide, mil et arachide, manioc et riz (en sec)... Il s'agit généralement d'associations traditionnelles, le plus souvent à faible rendement (variétés non sélectionnées, maladies, manque de soins culturaux) et déconseillées par les agronomes travaillant dans ces pays. Nous verrons au chapitre IV que, dans ces régions, les rendements des cultures pures sont souvent très inférieurs à ceux des associations.

Autres associations en climat tempéré.

On rencontre parfois des cultures associées dont l'une a un effet de brise-vent pour l'autre : betteraves-maïs, pommes de terre-tournesol, ou maïs, etc. Ces cultures (souvent traditionnelles) ont été étudiées par différents auteurs et nous en verrons des exemples dans le chapitre IV.

Des plantes herbacées sont parfois associées avec profit à des vignes

palissées (Bugey, Grésivaudan, Béarn en France par exemple). Nous les rangeons dans les cultures homogènes car la vigne n'a pas un développement supérieur à celui d'un maïs par exemple. Nous les retrouverons en II.1.2 car un arbre fruitier leur est souvent associé.

1. 2. *Cultures arborées*

Là encore, un très grand nombre de cas sont possibles.

Associations forestières.

On cite l'association peuplier-aulne, avec des résultats probants. Mais le plus souvent, on a association d'un brise-vent (cyprès, casuarina, peuplier par exemple) avec des arbres fruitiers. Nous renvoyons à l'article de GUYOT (1963) pour tout ce qui touche à ces problèmes de brise-vent,

Remarquons que les forêts naturelles sont très généralement constituées d'associations d'arbres (parfois en bouquets) ; les peuplements purs sont exceptionnels dans les régions tropicales, assez rares en régions tempérées, mais par contre fréquents dans les régions froides.

Associations fruitières.

On rencontre souvent des vergers dans lesquels deux ou plusieurs espèces ou variétés cohabitent, et des vergers où une même variété a été greffée sur des porte-greffes différents (quant à la vigueur par exemple) afin de pousser une partie de la plantation à une mise à fruit plus rapide. Il s'agit d'une véritable association culturale : ces arbres de comportement différent entrent généralement en concurrence entre eux et posent des problèmes particuliers à l'arboriculteur.

On peut citer un grand nombre d'associations de ce type : parmi les plus intéressantes on rencontre : avec l'*oranger*, soit le bananier (Liban, Israël, Afrique tropicale, Indes), soit un autre agrume (clémentinier par exemple; cette association est très fréquente en Afrique du Nord) soit le néflier du Japon, soit le caféier, aux Indes. Avec le *pommier*, on rencontre fréquemment le poirier ou un pommier de type différent.

Dans le Roussillon, on associe très généralement la plupart de nos arbres fruitiers.

Aux Indes, on mélange le caféier au poivrier qui a un ombrage léger.

Ces quelques exemples suffisent à montrer la généralité de la technique et la variété des espèces en association.

2°) CULTURES ASSOCIÉES HÉTÉROGÈNES

Nous nommerons ainsi des mélanges d'espèces de tailles très différentes et dont les durées végétatives sont généralement inégales. On aura une culture dominante (la plus élevée) et une culture dominée.

2.1 *Arbre et liane*

Cette pratique, courante en Italie (Toscane, Campanie), associe à un arbre fruitier ou forestier (peuplier le plus souvent) une vigne grimpante qui envahit peu à peu le tuteur et finit généralement par l'étouffer. On peut en rapprocher la coutume

fréquente en France, des pêchers plantés çà et là dans un vignoble. Particulièrement répandue dans le Roussillon, elle se rencontre dans bien d'autres régions de France (Grésivaudan, Val de Loire...) et d'Europe, soit avec le pêcher, soit avec d'autres arbres fruitiers (abricotiers, pommiers).

Aux Indes, dans le Malabar, on associe souvent l'aréquier (palmier) à la liane de bétel.

2.2. *Arbre et culture herbacée*

On rencontre ce type sous tous les climats avec une très grande variété de formes d'association.

Arbre forestier et culture annuelle.

Il s'agit, soit de brise-vent (région de Cavaillon, cf. article de GUYOT), soit d'arbres constituant la culture principale (peupliers de la plaine du Pô par exemple). Des cultures annuelles sont faites les premières années entre les lignes de plantation et le plus souvent remplacées par un engazonnement quand l'ombrage devient trop important. C'est un système cultural très évolué et qui a fait ses preuves quant à la rentabilité (contrairement à certaines cultures traditionnelles citées plus haut). L'hévéa, en région tropicale, est fréquemment cultivé avec une plante de couverture du sol (légumineuse), le plus souvent contre l'érosion.

Arbre fruitier et culture annuelle ou prairie.

Il s'agit souvent, comme dans le cas du peuplier, d'une utilisation du sol les premières années. On rencontre des cultures maraîchères (Cerdagne), des fraisiers (Italie), des céréales avec olivier et caroubier (en Italie du sud, en Grèce, à Chypre, en Syrie...) ou des fourrages temporaires. En zone équatoriale, citons l'association bananier-manioc (Congo ex-belge).

Un cas très spécial dans ces pratiques est l'association normande (et aussi anglaise) de pommiers à cidre dans une pâture permanente. Nous la reverrons par la suite,

Arbre fruitier et plante de couverture ou engrais vert.

Il ne s'agit alors que de protéger le sol (plante de couverture) ou d'apporter à une certaine période de l'année de la matière organique (engrais verts produits à des périodes de repos végétatif de la culture principale ou à des époques particulièrement pluvieuses) ; cette méthode a également pour but de réduire le travail du sol et de préserver ainsi le système radiculaire superficiel. Des fauches répétées, laissées sur place, forment un tapis organique. Ces systèmes, fréquents en régions équatoriales et tropicales (plantes de couverture) se retrouvent en région méditerranéenne (non-culture des agrumes) [1] et en zone tempérée (engrais verts et engazonnement), Du caféier au giroflier, du pommier aux agrumes et à la vigne, on peut dire que la totalité des arbres fruitiers est, plus ou moins, cultivée en association.

[1] Non-culture est la traduction de l'expression américaine *no tillage culture* qui désigne l'absence de façon aratoire dans un verger.

3°) Associations oasiennes a deux ou trois étages de végétation

3.1. *Associations d'oasis sahariennes chaudes*

Le palmier dattier est très généralement la culture principale. On cite cependant (Afrique du Sud, Chili, etc) des oasis chaudes sans palmiers. En palmeraie traditionnelle, on rencontre très souvent sous celle-ci un arbre fruitier à développement plus limité (abricotier, figuier, grenadier, olivier, etc.) et une troisième strate de cultures annuelles (céréales ou culture maraîchère) ou de luzerne.

Cet ensemble complexe est généralement simplifié en culture moderne : le palmier est associé à une culture annuelle ou à de la luzerne, ou cultivé en sol nu en culture industrielle. Il semble que dans ce cas, il ne bénéficie pas en réalité de son isolement (en dehors de problèmes purement techniques) et que l'association soit à encourager très généralement, surtout dans les palmeraies modernes à faible densité de plantation (cf. l'article sur la palmeraie d'El-Arfiane).

Nous verrons plus loin les problèmes posés par l'utilisation de l'eau dans ces conditions climatiques.

3.2. *Associations d'oasis « froides »* (Syrie, Asie centrale, etc.)

Quand les conditions climatiques empêchent la croissance normale du palmier dattier (basses températures hivernales, sommes des températures ou luminosité insuffisantes) l'oasis prend un aspect différent : peupliers et arbres fruitiers (abricotiers, cerisiers, oliviers, noyers...) la dominent ; dans des conditions plus extrêmes encore, on rencontrera des oliviers de Bohème (*Eleagnus angustifolia* = Châlef).

La strate herbacée prend alors une plus grande importance relative ; mais les caractéristiques climatiques générales resteront semblables à celles des oasis plus chaudes. Nous verrons au chapitre IV-3, comment on peut envisager sur le plan théorique ces types d'associations.

III. — ANALYSE DES FACTEURS AGISSANT SUR L'ASSOCIATION

1. Facteurs autres que l'eau

1.1. *Complexe héliothermique et ses modifications par l'association*

L'interaction de la lumière et de la température sur les plantes a été mise en évidence par H. Geslin (1944, 1952) et la méthode d'étude de ces phénomènes n'est en rien modifiée quand on passe à des cultures associées, la culture dominante jouant le rôle d'un écran pour la culture dominée. Nous étudierons successivement ces deux éléments.

Lumière et rayonnement.

Rappelons d'abord qu'il faut distinguer dans l'intensité du rayonnement, l'éclairement énergétique et l'éclairement lumineux. L'éclairement énergétique sera exprimé en watt.cm^{-2} ou en cal.cm^{-2}.mn^{-1} (ou jour $^{-1}$), l'éclairement lumineux en lux

(lumen.m^{-2}) ou en phot (lumen.cm^{-2}). Le rapport entre ces deux mesures n'est pas constant et varie avec la composition spectrale de la lumière. Un flux énergétique ayant traversé un végétal est modifié. La représentation des besoins des plantes en unités lumineuses ne fournit qu'un ordre de grandeur de la valeur que l'on veut mesurer. De même, il n'y a pas rapport direct entre éclairement lumineux et éclairement nécessaire à la photosynthèse, la sensibilité spectrale des plantes étant différente de celle de l'œil. « Seules les radiations visibles paraissent agir sur la photosynthèse, et il est vraisemblable que les courbes de sensibilité diffèrent avec les espèces végétales et les conditions de milieu dans lesquelles elles poussent » (R. DURAND, 1960).

Efficacité photosynthétique et rayonnement.

La plupart des plantes cultivées ont des besoins importants en lumière ; leur point de compensation d'assimilation nette du gaz carbonique représente des valeurs déjà élevées de rayonnement. Ce sont pour la plupart des héliophytes stricts. Dans le cas de cultures associées, la plante dominée ne reçoit qu'une fraction du rayonnement solaire. A l'intérieur d'un peuplement végétal, l'ombre rencontrée est une ombre verte, très différente de l'ombre portée d'un corps (GODARD, 1949). Ceci est important pour son comportement au cours de l'année : dans les régions situées au nord du 45e parallèle, la radiation globale pendant l'hiver et le début du printemps est faible, souvent moins de 100 cal.cm^{-2}.j^{-1}). Même dans le cas où la structure dominante est à feuilles caduques, l'ombre portée par les troncs peut atteindre 50 p. 100 de la lumière et on notera souvent un retard au départ en végétation de la plante dominée. Mais les plantes sont plus ou moins sensibles au manque de lumière et certaines graminées pourront donner des rendements appréciables avec un ombrage léger (cf. DE PARCEVAUX 1963).

Dans le cas du rayonnement net, arrivant au niveau du sommet de la culture dominante, on aura la valeur classique : $R_{net} = (1\text{-}a)Rg + R_1$ dans laquelle a = albédo de la région, R_{net} = rayonnement net, R_g = rayonnement global (cf. cette courbe de rayonnement à El-Oued dans notre article sur El-Arfiane), R_1 = Rayonnement de grande longueur d'onde = Ra - Rt, Ra = rayonnement atmosphérique et Rt = rayonnement terrestre.

Dans le cas de l'association, les plantes dominées seront placées dans des conditions différentes. Mais remarquons que les feuilles situées en-dessous du niveau supérieur des cultures sont susceptibles de subir un éclairement considérablement réduit (GODARD, 1949). La majorité des feuilles d'une culture pure se trouve donc placée dans les mêmes conditions que celles d'une culture associée. Il en va de même pour les talles secondaires d'une céréale ombragées par les talles principales ; dans un sorgho par exemple des resemis resteront nains en grande partie à cause de l'ombrage des plantes plus vigoureuses. Mais si on effectue une fauche précoce, ces plantes nanisées montent au niveau des autres. L'absorption par le végétal dominant réduira le rayonnement global d'une fraction α_0 ; on aura modification des rayonnements de grande longueur d'onde : R', ce qui pourra avoir une action importante par nuit de gelée. Enfin, l'albédo prendra une autre valeur a' au niveau de la culture dominée : $R'_{net} = \alpha_0 (1\text{-}a') R_g + R'_1$

Si un troisième étage de végétation est situé dessous, ses coefficients diffèreront encore.

D'autre part, la *qualité* de la lumière ne sera pas la même : on aura enrichissement en vert-jaune (ombre verte) dans des proportions variables selon le végétal, son âge et la densité de plantation. Ces rapports absolus varieront aussi en fonction de l'intensité lumineuse à la limite de l'ennuagement, etc. Une illustration de ces étages est donnée par la photo 1, prise dans l'oasis d'El-Arfiane. Pour l'étude théorique des facteurs du rayonnement, nous renvoyons aux articles de R. J. BOUCHET et S. DE PARCEVAUX. Les valeurs absolues d'éclairement varient considérablement d'une saison et d'un lieu à l'autre : quand le rayonnement passera de 100 à 600 $cal.cm^{-2}.j^{-1}$, le même éclairement relatif de 50 p. 100 vaudra 50 ou 300 $cal.cm^{-2}.j^{-1}$, ce qui n'aura bien évidemment pas la même signification au point de vue assimilation chlorophyllienne pour les plantes.

PHOTO 1. — *Association d'oasis à El-Arfiane* (*photo* GIRARD)

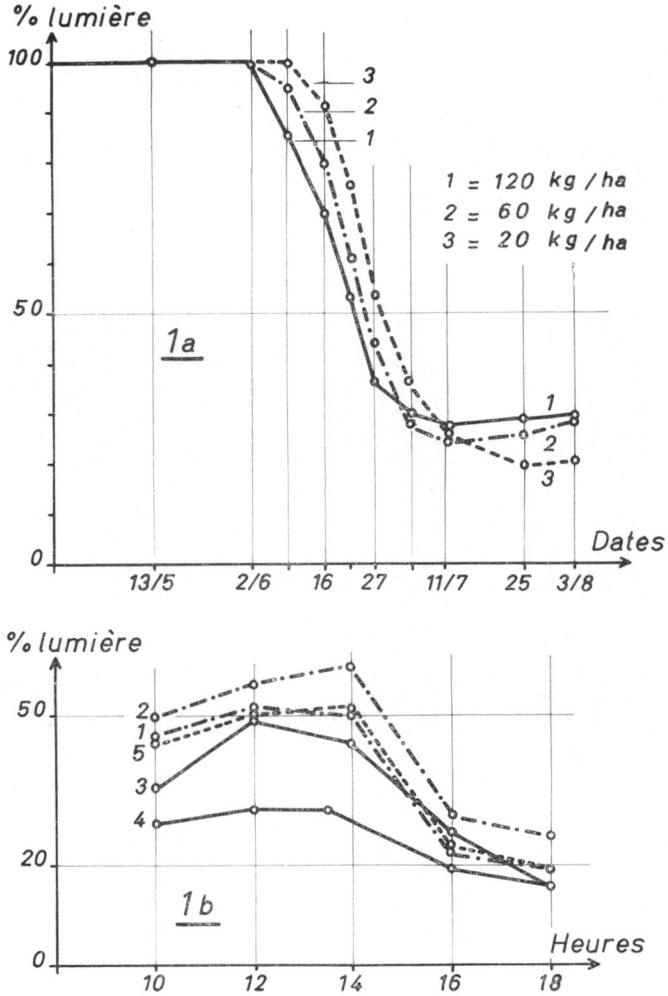
L'ombrage variera beaucoup, selon que la végétation dominante sera orientée Est-Ouest ou Nord-Sud. Dans le premier cas, les plantes pourront avoir un éclai-

TABLEAU I

Rendement d'une culture d'avoine et de trèfle associés au moment de la récolte de l'avoine (d'après BELOVA, 1958*)*

Mode et densité de semis de l'avoine	Rendement	
	Avoine (grains)	Trèfle (matière verte)
(1) $4 \cdot 10^6$ grains/ha semis en ligne	20,0 q/ha	57,5 q/ha
(2) $4 \cdot 10^6$ grains/ha un rang sur 2.....	24,1 q/ha	85,5 q/ha
(3) $8 \cdot 10^6$ grains/ha semis simple.....	24,0 q/ha	36,7 q/ha
(4) $8 \cdot 10^6$ grains/ha un rang sur 2.....	25,8 q/ha	32,5 q/ha
(5) $6 \cdot 10^6$ grains/ha un rang sur 2.....	25,8 q/ha	86,3 q/ha

rement faiblement diminué, de composition assez peu modifiée. Dans le second, il sera fréquemment réduit de 80 p. 100. Cette constatation a échappé à beaucoup



GRAPH. 1 *a*. — *Pourcentage moyen de lumière pénétrant dans l'Avoine en fonction de la densité de semis* (d'après BULA)
GRAPH. 1 *b*. — *Pourcentage d'éclairement du Trèfle sous Avoine durant le jour en fonction de la densité de semis* (d'après BELOVA)

d'auteurs. La décroissance de la lumière à l'intérieur d'un peuplement est très variable selon les plantes : c'est ainsi que le chanvre réduit fortement la lumière dès sa cime, alors que dans le seigle, on a une décroissance progressive. Certaines plantes cultivées sont originairement des plantes de sous-bois (fraisier, asperge par exemple). On peut penser à priori, qu'elles supporteront mieux une telle ambiance que des graminées steppiques comme le blé.

On a déterminé, dans des associations homogènes légumineuse-graminée, les pourcentages de lumière atteignant la plante dominée. Aux premiers stades de

la croissance, la lumière arrivant au sol n'est pas réduite ; elle tombe au tiers ou au cinquième de sa valeur normale lors de la floraison de la graminée (BULA, 1954). Selon l'heure de la journée et la densité de semis, la proportion d'éclairement au voisinage du sol varie (BELOVA, 1958). Ces variations sont représentées sur les graphiques I *a* et *b*.

Les variations d'éclairement et la disposition de l'association dans le champ entraînent des variations dans les rendements : le fait, par exemple, de ne semer la plante dominante que tous les deux rangs, améliore nettement l'éclairement et son rendement à densité égale. Quand celle-ci augmente au-delà d'un seuil, le rendement de l'associé dominé décroît, sans que celui de la culture dominante s'accroisse sensiblement. La dose de semis intermédiaire (5) s'avère la plus favorable dans le cas considéré (tableau 1). Nous voyons apparaître la notion d'indice de surface foliaire (LAI) : Leaf Area Index des Anglo-saxons [1].

Dans le cas d'associations hétérogènes (comme un arbre et une culture annuelle) des baisses de rendement sont souvent signalées pour la culture dominée, mais on observe aussi une modification de la composition chimique de la manière végétale produite, notamment les taux respectifs de chlorophylles A et B et les rapports glucides/protides. Nous y reviendrons plus loin.

Cependant, le niveau absolu d'éclairement joue beaucoup : ce qui est vrai en climat peu lumineux ne doit pas être transposé en lumière intense ; l'ombrage peut, en montagne, amener une réduction de l'ultraviolet bénéfique pour certaines plantes. Son influence sur la qualité des produits peut être favorable ou défavorable.

Température.

Lois de croissance. — Lumière et température sont en liaison étroite. A de fortes densités lumineuses correspondent généralement des températures élevées (sauf en haute montagne). L'association culturale modifiera aussi la corrélation puisque l'éclairement de la culture dominée est réduit, tandis que la température de l'air varie peu. Mais la température des feuilles ombragées, dont les stomates sont ouverts est souvent inférieure à la température de l'air de plusieurs degrés (jusqu'à 5°C) ; au contraire, les feuilles au soleil peuvent atteindre une dizaine ou même une vingtaine de degrés de plus que l'air quand leur système stomatique est fermé et qu'elles ne présentent plus qu'une évaporation cuticulaire (DE PARCEVAUX, 1963). La température des feuilles ombragées sera généralement plus constante au cours de la journée.

Avec des températures élevées et une lumière affaiblie (H. GESLIN, 1944), on notera souvent un mauvais taux de croissance car le taux net d'assimilation du gaz carbonique [2] sera peu élevé (DE PARCEVAUX) la respiration sera forte du fait des températures élevées et l'assimilation chlorophyllienne réduite par l'affaiblissement de la lumière. Nous verrons à propos de l'évapotranspiration que le bilan peut cependant être moins mauvais qu'il n'y paraît d'abord. En outre, certaines plantes présentent des courbes d'assimilation favorables même en lumière quelque peu réduite.

Il serait nécessaire d'étudier quelles plantes pourraient profiter d'un certain taux de réduction de la lumière pour une thermopériode donnée. Ces recherches restent malheureusement à faire pour la plupart.

[1] Rapport de la surface foliaire à la surface occupée sur le terrain.
[2] En anglais Net Assimilation Rate (NAR).

Incidents climatiques. — Dans les régions méditerranéennes et tempérées, le problème des gelées printanières se pose souvent. Le sol nu favorise une remontée de chaleur plus importante qu'un sol cultivé. Donc la plante dominée peut accroître le risque pour la plante dominante : un verger enherbé est plus susceptible de subir des dégâts lors d'une gelée printanière. Inversement, la plante dominante peut protéger la plante dominée par l'écran au rayonnement terrestre qu'elle procure. Nous avons pu noter une certaine protection dans une vigne complantée en pommiers, sous ceux-ci. Le problème est complexe et on peut penser que l'association peut être favorable dans certains cas au moins.

D'autre part, une baisse de quelques degrés de la température du sol peut entraîner un retard de croissance de plusieurs jours, voire de quelques semaines Un couvert herbacé peut alors influencer la végétation dominante car la surface du sol atteindra des températures moins élevées du fait de son évapotranspiration.

L'association hétérogène (arbre-plante annuelle) provoque parfois un retard à la maturation des fruits de l'arbre qu'on attribue à un retard de l'échauffement du sol. Cet effet est rarement supérieur à 8 jours (BLONDEL, 1959 ; BOULAY, 1953) et le choix des variétés peut éliminer cet inconvénient.

On a noté des dégâts dus à une dessication trop intense dans des associations de brise-vent et arbres fruitiers ou cultures herbacées (en région méditerranéenne, par exemple), soumises à des conditions de chaleur sèche prolongée telles qu'elles ne peuvent fournir un débit d'eau instantané suffisant pour lutter efficacement (GUYOT 1963).

Les températures ont donc un double effet sur les lois de croissance et les accidents climatiques. On peut cependant proposer des solutions à ces problèmes notamment à l'aide de l'irrigation.

1.2. *Le sol*

On trouve peu de données précises dans la littérature sur les rapports existant entre le sol et les associations culturales.

Structure et fertilité.

La richesse organique du sol sera mieux conservée si une bonne partie des produits végétaux de l'association est laissée sur place. L'accumulation et la déperdition de la matière organique dans un sol sont liées à de nombreux phénomènes et notamment à sa vitesse de transformation (HENIN, 1960). Un apport de matière organique fraîche augmente la vitesse de transformation de celle qui est déjà présente dans le sol. Si, dans les pays tempérés atlantiques, en terres de culture, les teneurs en matière organique totale sont généralement satisfaisantes, les rapports C/N traduisent souvent un déséquilibre ; dans les sols méditerranéens et tropicaux les températures élevées et la répartition des pluies entraînent sa dégradation très rapide et de faibles teneurs. Or c'est une source importante de gaz carbonique pour la plante et il est nécessaire d'en maintenir le niveau dans ces régions.

On trouve fréquemment des résultats d'essais concluant que l'enherbement sous vergers est inefficace ou même nuisible. Il est cependant admis maintenant, dans le cas de fourrages associés, que leur volume radiculaire est supérieur à celui d'une culture pure équivalente et que la masse organique laissée dans le sol équivaut

à une importante fumure. Les cas controversés proviennent généralement de ce que les auteurs n'ont pas prêté assez d'attention aux équilibres organiques et chimiques dans le sol et n'ont pas observé la loi du minimum (KURZTEN, 1952).

On rencontre des avis très divergents sur la conservation de la fertilité en culture associée : il faut distinguer les associations dont les divers composants sont presque entièrement exportés (vesce-avoine, pommier-pâturage par exemple) de celles où une fraction importante de la matière verte est laissée sur place, engrais verts ou cultures partiellement enfouies comme les fanes de pommes de terre, les feuilles de betteraves, etc.

Dans le premier cas les exportations minérales seront importantes et obligeront à restituer sous forme d'engrais ces éléments à des doses permettant la satisfaction des besoins des diverses cultures. On aura à envisager des méthodes spéciales d'apport pour les éléments non migrateurs. Nous n'insisterons pas sur ces techniques en dehors de notre compétence ; diverses solutions sont proposées dans la littérature.

Il est plus difficile de maintenir un niveau de fertilité satisfaisant en culture associée qu'en culture pure car les besoins des diverses plantes ne sont pas les mêmes ou se produisent à des périodes différentes, et on peut avoir une certaine consommation de luxe. Des apports d'azote au printemps, destinés à compenser pour la culture dominée le handicap d'une luminosité réduite, des apports de potasse poussant à fruit, pourront être souhaitables. Des équilibres nouveaux de fumure sont à étudier.

Quand les besoins optimaux de l'association ne sont pas assurés, il est difficile de conclure sur ses avantages et ses inconvénients quant à la conservation de la fertilité.

Vis-à-vis de la structure, on pense généralement que l'association d'une plante herbacée à un arbre améliore la couche superficielle du sol et notamment sa perméabilité pour l'eau. Un enherbement plus ou moins permanent permet une occupation intense du sol et une meilleure aération et assure une amélioration de la structure grâce au développement important des racines des diverses plantes associées dans les couches superficielles sans qu'un tassement ou une semelle de labour puissent se produire ; bien au contraire, les observations ont permis de conclure à sa disparition en quelques années sous l'action du système radiculaire quand celui-ci n'est plus détruit systématiquement par les façons aratoires répétées. La culture herbacée a aussi pour effet d'assainir le sol durant les périodes très pluvieuses si on a soin de choisir des plantes à fort développement durant cette période. Ceci améliore la productivité de l'eau pour l'ensemble de la production. Il existe en effet un problème de résistance des plantes à des périodes de saturation en eau du sol (SAKAMOTO, 1960).

Une bonne structure et son maintien par la végétation herbacée sont importants si on désire maintenir ou améliorer la fertilité du sol. L'amélioration de la porosité totale des couches superficielles et profondes, d'où résulte une capacité meilleure pour l'eau et l'air, permettra d'obtenir des rendements élevés et stables. Nous verrons réapparaître ce problème à propos de l'alimentation en eau de la plante.

Conservation du sol et lutte contre l'érosion.

La conservation du sol est presque toujours envisagée quand on veut maintenir ou améliorer la fertilité ; d'une importance capitale, elle ne doit jamais être négligée quand on étudie la mise en valeur ou l'amélioration d'une région.

Beaucoup de techniques culturales actuelles aboutissent à une dégradation plus

ou moins rapide des horizons de surface quand les conditions topographiques et climatiques ne sont pas parfaites. Les méthodes de culture minière naguère en vigueur dans la plupart des pays neufs y ont laissé des traces ineffaçables : ces méthodes ont même envahi des pays où elles n'auraient jamais dû paraître. Le problème se pose en fait dès que les cultures ont une longue phase de repos laissant le sol nu, si des vents violents soufflent fréquemment pendant ces périodes ou si des pluies brutales, dépassant la capacité d'absorption instantanée du sol, tombent sur la région et ce, même si les pentes sont faibles.

Parmi les méthodes de lutte proposées contre les érosions éolienne et hydrique, on réserve une large place aux couvertures herbacées (ITO, 1960 ; MALYGIN, 1959 ; SAKAMOTO, 1960 ; SUTA, 1958). Les méthodes de non-culture des agrumes (BLONDEL, 1954) reviennent au même : moins on touche au sol, mieux il est maintenu en place par le chevelu radiculaire et le mulch de matières organiques en décomposition et mieux il pourra résister aux attaques mécaniques de l'eau et du vent.

Notons (GUYOT, 1963) que dans des zones de brise-vent denses, dégarnis à la base on peut avoir accélération de l'air à la surface du sol. Il sera nécessaire de se prémunir contre de tels effets nocifs, visibles parfois aussi sous des arbres en haute tige, par un engazonnement ou une couverture bien fixée par ses racines. Ces problèmes sont liés à ceux de l'utilisation de l'eau par la plante.

Mais une culture associée ne joue pas toujours un rôle protecteur favorable. Elle peut même avoir un effet plus nocif qu'un sol non cultivé : c'est notamment le cas des associations traditionnelles du Bassin méditerranéen semi-aride d'oliviers et de céréales sur des pentes. On a des pluies hivernales violentes et la céréale couvrant mal le sol joue très imparfaitement son rôle de fixation. Dès le début de l'été, elle est récoltée, la paille est coupée ras et on fait pâturer les chaumes. Le sol est mis à nu ; très sec et pulvérulent, il est la proie idéale de l'érosion éolienne et on assiste à un déchaussement progressif de l'olivier. Une végétation spontanée laissée sur place au printemps aurait eu au contraire un rôle protecteur (TOFANI, 1960). De telles pratiques sont effectivement à proscrire d'autant, comme nous le verrons, que le bilan hydrique défavorable de ces zones sèches ne peut permettre de superposer deux cultures.

1.3. *Interactions des plantes associées*

Elles agiront à tous les niveaux.

Modifications du complexe climatique.

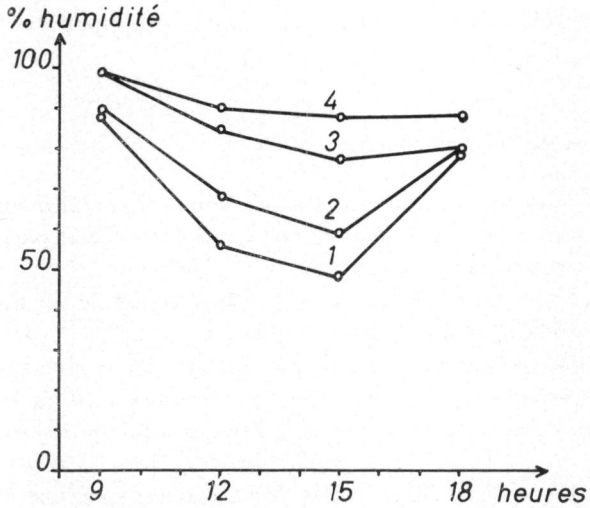
Les facteurs entrant en jeu sont nombreux : la lumière est réduite, mais l'humidité de l'air est plus élevée alors que sa température est peu modifiée. On signale généralement une évolution du rapport racine/tige (R/T) pour la plante dominée : les feuilles deviennent plus minces et leur surface relative augmente, les tiges ont tendance à pousser en hauteur. R/T diminue généralement, mais dans certains cas l'effet de brise-vent prédomine et pour des betteraves par exemple (BRINGMANN, 1955) R/T peut augmenter. Nous verrons cet exemple plus en détail au chapitre IV.

La baisse d'éclairement réduit souvent la fructification des héliophytes ; en revanche les fruits seraient plus gros. Mais il faut considérer le niveau absolu d'éclairement (cf. ci-dessus III-1). Si celui-ci est suffisant, il permettra une ouverture plus complète des stomates. Si le sol est bien alimenté en matières organiques et en eau,

il pourra fournir des doses importantes de CO_2. Ces conditions seront alors favorables à une photosynthèse active. La transpiration de chaque plante sera plus faible qu'en culture pure du fait de l'accroissement de l'humidité atmosphérique dû à l'effet de brise-vent de l'association (graphique 2) et à la superposition des surfaces transpirantes. Ainsi, l'association permettra un meilleur taux net d'assimilation (NAR) de chaque plante à température égale par unité de volume d'eau consommée. Ces modifications climatiques seront d'autant plus favorables que le climat sera plus aride (DE PARCEVAUX, GUYOT). Nous reverrons ces problèmes au paragraphe III-2.3.

Action de l'association au niveau radiculaire.

Les problèmes d'interaction ont été très discutés et on trouve des avis diamétralement opposés (BLONDEL, 1959 ; DAVISON, 1951 ; FRITH, 1952 ; SAKAMOTO, 1960). Nous en verrons des exemples chapitre IV. Cependant, quelques notions parais-



GRAPH. 2. — *Influence de la couverture végétale sur les variations hygrométriques diurnes* (d'après MARTINI et TUBNER, cité par GODARD, 1949)
(1) Air libre ; (2) dans le peuplement à 50 cm du sol ; (3) à 20 cm du sol ; (4) à 10 cm du sol

sent assez générales : Les racines sont presque toujours réduites quand l'humidité de l'air et du sol est élevée ; la plante dominée a donc souvent un enracinement moins profond et utilise l'eau disponible en surface. Cette disposition sera évidemment défavorable si une période sèche survient. Mais un engrais vert, planté durant la période de repos d'arbres fruitiers, aura une réaction différente : il développera un système radiculaire puissant, pouvant atteindre un mètre dans le cas d'une fèverole (DROUINEAU, 1951) qui équivaudra à un sous-solage pour le verger ou le vignoble dans lequel il aura été planté, si l'alimentation en eau est suffisante : les poids de sarments ou de bois de taille pourront doubler l'année suivante.

Dans un verger enherbé en ray-grass les poiriers ont un système radiculaire régulièrement réparti sur les 60 cm du profil et quelques racines descendent plus bas, alors qu'en sol travaillé, ces racines se cantonnent surtout dans les 20 premiers centimètres sans pouvoir traverser la semelle de labour (cf. paragraphe III-1.2). Le ray-

grass associé permet donc à l'arbre de coloniser plus intensément un volume plus grand de sol. Nous verrons l'importance de ce phénomène à propos de la productivité de l'alimentation en eau de l'association. Le ray-grass s'installe essentiellement dans les 20 premiers centimètres, mais envoie quelques racines en profondeur et équivaut pour le sol à une importante fumure organique (MICHELET, 1962).

Dans une association légumineuse et graminée bien choisie, la graminée colonise le sol plutôt en surface, tandis que la légumineuse a un système radiculaire moins dense, mais descendant plus profondément (SCHWENDIWAN, 1953).

L'association amène des phénomènes de concurrence pour les engrais, notamment le potassium : l'agrostis par exemple, le fixe si intensément que le trèfle ladino ne peut plus croître (GRAY, 1953). Par contre, le phosphore assimilable a tendance à augmenter sous un sol gazonné (SAKAMOTO, 1960). La forte consommation en azote doit être compensée sous peine d'abaisser le rendement des arbres ; la couverture herbacée devra être fauchée fréquemment pour la maintenir à l'état de gazon (REYNTENS, 1959). En région gélive, on pourra la supprimer temporairement à la floraison de l'arbre.

Interactions chimiques et biologiques.

NISHIMURA (1955) a effectué des essais de compétition. Il montre que pour des doses de semis exagérées, c'est l'avoine qui se concurrence le plus dangereusement elle-même et en tous cas plus que la vesce.

SVINAREV (1957) conclut à l'émission par les racines de substances inhibitrices qui seraient absorbées par les plantes sensibles.

Dans un mélange Lolium-phalaris, DONALD (1958) trouve que la compétition pour les engrais est plus nocive que celle pour la lumière. Pour BLANCHET (1962), le manque d'eau dans un mélange luzerne-ray-grass inhibe l'absorption du potassium.

On a signalé des cas défavorables d'associations graminées-légumineuses et on a avancé qu'il s'agissait de secrétions nuisibles (AHLGREEN, 1939 ; CANNON, 1961). Cependant, HARVEY (1951) arrive à des résultats exactement inverses avec des augmentations de rendement de 90 p. 100 en faveur du mélange sans pouvoir démontrer un transfert d'azote de la légumineuse vers la graminée. SVINAREV dit cependant qu'il a mis en évidence des secrétions racinaires d'acides, sucres, alcools et ferments (enzymes ?).

En conclusion, les problèmes d'interactions entre plantes sont très complexes et encore mal connus. L'incertitude des résultats publiés rend toute interprétation hasardeuse. Il ressort cependant de la littérature que de telles interactions doivent exister dans certains cas au moins. Il ne peut s'agir de phénomènes purement physiques (liés par exemple aux densités de semis), mais d'actions physiologiques et biochimiques qui doivent se produire entre les composantes de l'association selon des processus variables.

Les facteurs climatiques jouent aussi un rôle important dans ces phénomènes et tout spécialement ceux qui sont liés au rayonnement.

2. — L'EAU ET L'ASSOCIATION

Après avoir examiné successivement les divers types d'associations qu'on peut rencontrer, l'action du complexe héliothermique et des facteurs édaphiques et les interactions des plantes associées les unes sur les autres, nous allons étudier comment l'association agit sur le bilan de l'eau et sur la productivité de celle-ci. Nous chercherons à faire ressortir les effets positifs ou négatifs de l'association vis-à-vis des conditions naturelles de végétation. On étudiera comment elle peut améliorer la productivité et conduire à une meilleure utilisation des potentialités climatiques liées à la notion d'évapotranspiration potentielle ; comment enfin une alimentation artificielle de l'ensemble chaque fois que les conditions d'évapotranspiration potentielle dépassent les possibilités d'alimentation en eau du sol peut assurer des niveaux élevés de rentabilité.

2.1. *Alimentation en eau du sol*

La couverture du sol par une plante herbacée a plusieurs effets sur l'alimentation en eau des sols et la protection de ceux-ci. On oublie souvent qu'une couverture vivante d'un sol est une association. Nous étudierons particulièrement les avantages et les inconvénients de l'association par rapport à la productivité de l'eau.

Périodes pluvieuses et intensité des pluies.

La réalimentation des sols dépend de la succession plus ou moins régulière de périodes d'approvisionnement et de déficit. C'est ainsi qu'en région méditerranéenne, on a des pluies durant le semestre hivernal froid alors qu'en Floride ou en régime de mousson, elles tombent pendant la période estivale. En climat océanique et tempéré les précipitations sont assez régulièrement réparties dans l'année.

Le rythme pluvial a une grande importance pour la reconstitution des réserves : des pluies de longue durée et faible intensité (moins de 1 $mm.h^{-1}$) pénétreront aisément dans la plupart des sols si la pente n'est pas trop forte. Ce sera généralement le cas des régions océaniques ; mais des pluies intenses comme les orages d'été en climat continental, ou de longue durée comme les pluies d'automne méditerranéennes ou les pluies de mousson. dépassent souvent 10 $mm.h^{-1}$; peu de sols sont capables d'absorber l'eau à cette vitesse et la moindre pente provoque des écoulements importants. D'autant que, si le sol est très sec, il présente une hydrophobie qui exagère encore le phénomène.

Action de la couverture herbacée.

Ces observations ont conduit depuis quelques années à se préoccuper des écoulements superficiels et de leur limitation. Il est intéressant de lutter contre ceux-ci en améliorant la perméabilité des sols en ou évacuant l'eau sans érosion. Diverses méthodes sont préconisées, mais on conseille presque toujours une couverture végétale quand on cherche une protection durable et efficace.

Ceci amène à envisager des associations culturales. En fait le terme est rarement employé : on parle de non-culture, d'engazonnement, de prairies sous vergers, d'engrais verts temporaires ou permanents.

On admet qu'avec une pente même faible, des pluies d'orage entraînent une érosion importante en sol nu ; un enherbement permet d'absorber une partie du ruissellement et d'évacuer le reste sans érosion, les particules de sol étant solidement fixées par le système radiculaire superficiel, en particulier par celui des graminées.

Certains engrais verts comme la féverolle (*Vicia faba*) peuvent laisser subsister une certaine érosion ; si la pluie tombe avec assez de violence, des écoulements peuvent se produire entre les pieds dont l'enracinement est alors peu efficace.

Consommation d'eau de l'association.

Outre cet important aspect antiérosif, qu'on rencontre même dans des régions à pluviosité également répartie au cours de l'année comme la Normandie, l'association a un autre rôle. Quand les diverses plantes n'ont pas la même période d'activité l'une est capable d'utiliser l'eau tandis que l'autre est à l'état de repos : c'est le cas des prairies sous vergers à feuilles caduques en climat océanique. Les pluies tombant durant la période de repos végétatif de l'arbre seront mieux absorbées par le sol grâce à sa perméabilité améliorée et partiellement utilisées par la plante de couverture ; ce qui assurera une meilleure aération et évitera très souvent la formation de sols saturés asphyxiants. Certains sols sont beaucoup plus sensibles que d'autres à ce phénomène (DOLGOV, 1948) et l'effet pourra être important tant au réveil de la végétation que sur les rendements.

Périodes de déficit et effets dépressifs de l'association.

Elles sont dues soit à la cessation plus ou moins totale de la pluie pendant une période donnée, soit à une évapotranspiration plus grande que la réalimentation en eau par la pluie. C'est le cas des régions dites humides. Les auteurs y jugent généralement l'association défavorable. (BOLLARD, 1957 ; MAUME, 1946 ; PEREIRA, 1962 ; TOFANI, 1960) car leurs essais ont *souffert de la sécheresse*. Si des irrigations ont été données, l'implantation de l'association a presque toujours été décidée brusquement et établie, dès l'abord, sur la totalité de la surface (souvent sur de jeunes arbres). La dépression maximale est notée en général pendant les premières années de culture associée.

BLONDEL (1959) et MICHELET (1962) expliquent clairement ces effets dépressifs sur les rendements et BLANCHET (1962) explicite certains phénomènes de carence signalés dans le cas d'associations.

L'implantation d'un couvert herbacé complet dans un verger amène un brusque déséquilibre au niveau des racines dont le volume est souvent très réduit par les pratiques culturales antérieures, nous l'avons vu au paragraphe III-1.3. Quand ce système radiculaire est mis en compétition avec celui du couvert herbacé, l'arbre présente une chute de rendement brutale, car il n'a pu s'y préparer. La compétition pour les matières fertilisantes est d'autant plus marquée que trop souvent on néglige d'apporter immédiatement des doses complémentaires d'engrais et d'eau : or, la couverture végétale associée exige pour croître une fertilisation importante et la satisfaction de ses besoins en eau. Dans le cas d'une deuxième culture, la plus grande partie des éléments minéraux sera exportée ; dans le cas d'un engrais vert, ils seront bloqués pendant un temps plus ou moins long dans les débris végétaux : on produit en effet plus de matière sèche avec la même quantité d'eau.

Si des apports suffisants ne sont pas faits les premières années, on notera un dépérissement plus ou moins marqué ou au moins un arrêt de croissance. Quand par la suite, l'arbre reprendra sa croissance (et il peut se faire qu'il n'y parvienne jamais si les éléments ont été exportés), il aura un retard *permanent* sur le témoin.

Ce phénomène est particulièrement net dans les prés-vergers où l'on a une exportation d'herbe importante incomplètement compensée par les déjections et les apports d'engrais faibles ou nuls et où l'on note une sécheresse physiologique durant les mois d'été chaque fois que les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle de la région. Ceci conduit à écrire que l'association est néfaste (RÉGNIER, 1955) alors que ce sont les pratiques culturales qui sont inadaptées, ce qui est tout différent (JOUIS, 1952).

L'aspect bénéfique de l'association peut donc être masqué par des pénuries en eau ou en matières fertilisantes ; le fait même que plusieurs plantes exploitent indépendamment et avec des exigences différentes un même sol, accentue le phénomène : une couverture végétale complète du sol consommera plus d'eau que des arbres assez espacés en sol nu (au moins si celui-ci forme un mulch protégeant les réserves en eau de l'évaporation directe) (HALLAIRE, 1953). Toute eau directement évaporée, sans passer par un matériel végétal vivant, constitue une *consommation de luxe* dans le bilan final de la culture. Ce n'est pas une perte totale pour la plante, mais une utilisation moins bonne de l'eau, et la productivité en sera réduite.

2.2. *Action du volume exploré par les racines sur l'alimentation de l'association. Vitesse de dessèchement du sol.*

M. HALLAIRE (1963) développe les raisons permettant de croire qu'un volume plus grand de sol exploré plus intensément conduit à une meilleure alimentation en eau des cultures.

Le potentiel de l'eau dans la plante (pression de succion ou DPD) qui commande la réduction de l'évapotranspiration est en liaison étroite avec le potentiel de l'eau dans le sol. Or, si à une humidité H donnée le potentiel correspondant est Ψ (H), en fait, au contact même des racines, le *potentiel efficace* est donné par l'expression suivante (HALLAIRE, 1963).

$$\Psi_e = \Psi\,(\mathrm{H}) + \mathrm{K}\,\frac{\mathrm{L}}{\lambda}\,\frac{d\mathrm{H}}{dt}$$

dans laquelle K est un coefficient, L la longueur moyenne de parcours de l'eau dans le sol jusqu'aux radicelles et λ un coefficient de conductibilité variable avec le *type* de sol et son *humidité*.

Le deuxième terme du second membre représente la chute de potentiel de l'eau liée à sa diffusion localisée dans les agrégats du sol jusqu'à la racine. On voit que ce terme croit comme $d\mathrm{H}/dt$. Or, pour une évapotranspiration donnée $d\mathrm{H}/dt$ sera d'autant plus petit que le volume de sol exploré par les racines et soumis ainsi au dessèchement est plus grand : un gazon à très faible enracinement souffrira très vite de la sécheresse.

Le terme complémentaire dépend aussi de L. Or, L sera d'autant plus faible que le système radiculaire sera plus dense.

Il est inutile d'insister sur l'influence de l'humidité H qui intervient non seulement par le terme ψ (H) mais également dans λ.

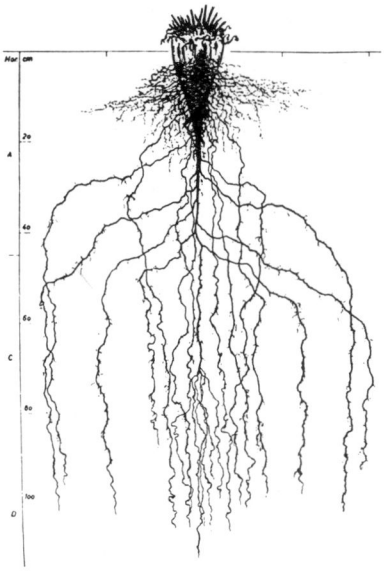


PHOTO 2. — *Système radiculaire de Betterave sucrière. Double système : superficiel dense à partir du sillon, profond extensif. En sol de limon profond (delta du Pô)*

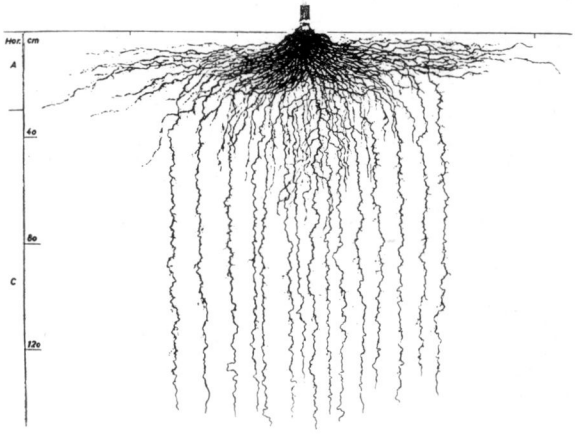


PHOTO 3. — *Système radiculaire de Tournesol, superficiel dense, profond extensif*

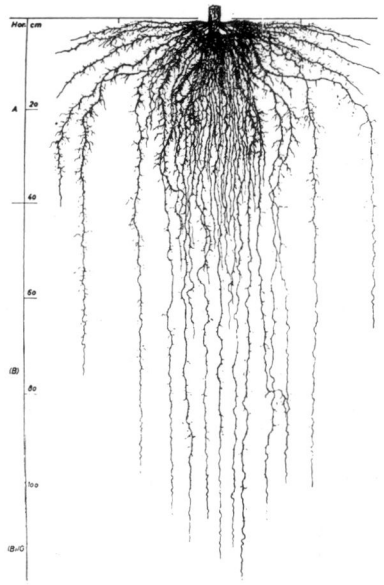


PHOTO 4. — *Système radiculaire de Maïs, assez semblable au précédent, mais moins profond et moins étalé. Sur le sol de limon en Allemagne*

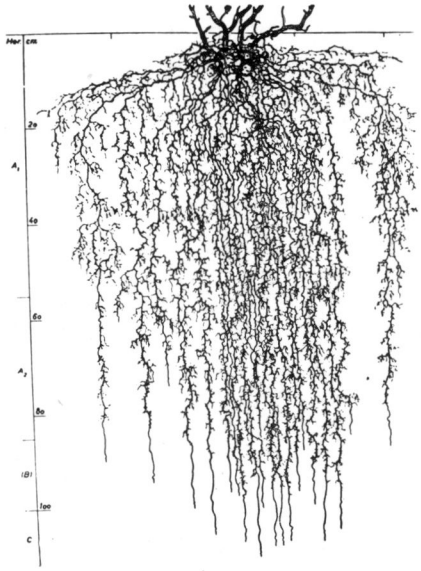


PHOTO 5. — *Système radiculaire de Pomme de terre, également réparti dans le profil. Sur sol brun morainique*

En définitive, le potentiel Ψ_e sera d'autant plus petit et l'évapotranspiration d'autant moins réduite que le sol sera exploré plus profondément et de façon plus intense par le système radiculaire. On peut penser que l'association culturale, pour être bénéfique, devra jouer dans ce sens.

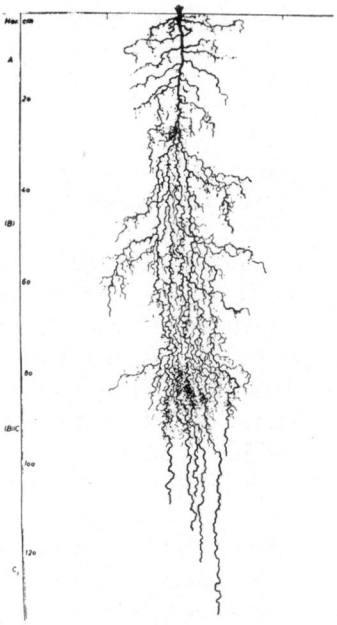


PHOTO 6. — *Système radiculaire de Luzerne, très pivotant, faible densité en surface* (0-30) *relativement plus dense en profondeur. En sol profond limono-argileux*

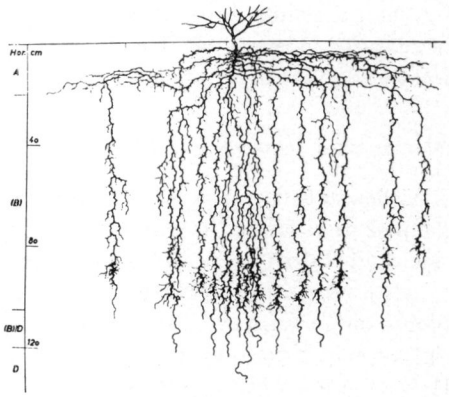


PHOTO 7. — *Système radiculaire de* Sinapis arvensis, *extensif à tous les niveaux, en sol limoneux profond* (Les photos 2 à 7 d'après L. KUTSCHERA 1960)

Action de l'association.

Elle pourra se comporter de deux façons : ou bien les systèmes radiculaires sont de développement semblable (cas d'une luzerne et d'un peuplier par exemple). L_r sera alors diminué ; ou bien ils auront tendance à coloniser des étages différents du sol et dH/dt sera réduit. Nous disons bien *tendance* car en fait, il y aura des racines de l'une et l'autre espèce à chaque niveau.

Un arbre au système radiculaire puissant peut généralement enfoncer profondément celui-ci dans le sol. Si, tel le peuplier, il a tendance à rester en surface, des méthodes appropriées de plantation (barbatelles) l'obligeront à se créer un système radiculaire profond.

Une graminée au contraire, de même qu'un grand nombre de plantes annuelles, forme, nous l'avons vu plus haut (paragraphe III.1.3), un chevelu superficiel intense et un nombre assez faible de racines profondes (cf. photos 2 à 7). Si le sol est bien structuré, aéré, et s'il n'est pas axphyxiant pendant les périodes très pluvieuses, un système radiculaire harmonieux se créera peu à peu : l'intense travail superficiel du sol par les racines de la graminée améliore la pénétration de l'air en

surface. Dans le cas d'une prairie néanmoins, on devra intervenir de temps en temps pour éviter qu'un feutrage excessif de racines n'empêche la pénétration de l'eau.

Les racines superficielles de l'arbre sont alors placées dans d'excellentes conditions de fonctionnement si l'alimentation tant hydrique que minérale ne leur fait pas défaut.

On a le même résultat pour beaucoup d'arbres, comme le pommier (MICHELET, 1962) et les agrumes (P. LARUE, 1954) à condition de les mettre progressivement dans les conditions de l'association et de leur fournir l'eau et la fertilisation nécessaires.

Possibilités d'alimentation du système aérien.

Elles sont liées à la fois à l'évapotranspiration potentielle, à la vitesse de dessèchement de la masse du sol explorée et au niveau d'humidité de l'ensemble du profil, ainsi qu'il ressort de la formule donnée plus haut.

« La régulation stomatique et la réduction de la transpiration sont influencées, comme on l'a vu, par l'évapotranspiration potentielle instantanée, le volume de sol exploré, la densité d'exploration des racines et la conductabilité du sol pour l'eau. » (HAGAN, 1959). L'humidité critique H_c atteinte par le sol et à partir de laquelle ETR devient différente d'ETP augmente avec ETP, mais elle diminue quand le volume de sol et son intensité d'exploration augmentent. H_c augmentera aussi avec des eaux salines ; ceci pourra réduire de façon importante les disponibilités hydriques pour la plante dans les régions où le problème se pose (cf. DAMAGNEZ et l'article sur El-Arfiane).

Le débit maximum q_{max} qui peut être assuré par un couvert végétal dépend de H, l'humidité du sol, mais aussi de la masse M de sol prospectée par les racines, de la densité du chevelu radiculaire et de la conductibilité λ du sol à chaque niveau. Il diffère de la réserve utile (RU) en eau du sol correspondant à la gamme capacité de rétention — point de flétrissement) : il s'agit de la réserve facilement utilisable (RFU), c'est-à-dire de celle que le végétal peut utiliser *sans réduire* son ETR. RFU = RU si ETP est faible et le volume radiculaire dense (cf. HALLAIRE, 1963).

Pour que l'ensemble du couvert végétal fonctionne au maximum (ETR = ETP), il est nécessaire qu'une grande masse de racines contribue à son alimentation ; ainsi, pour des conditions d'ETP données, l'alimentation restera d'autant plus longtemps optimale que le volume et la densité de racines seront plus grands.

2.3. *Évapotranspiration des cultures associées*

Évapotranspirations potentielle et réelle.

L'étude théorique de l'évapotranspiration (ET) est faite par ailleurs par R. J. BOUCHET. Il suffira de rappeler qu'on peut lier au rayonnement solaire l'évapotranspiration potentielle (ETP) et aussi l'évapotranspiration réelle (ETR).

« Si le couvert végétal est abondant et son alimentation en eau largement assurée, l'énergie disponible devient le seul facteur limitant et l'évaporation réelle nette correspond par définition à l'évapotranspiration potentielle » (R. J. BOUCHET). On a R_{net} ETP.

Pour l'expression de ETP en fonction des données météorologiques nous

prions le lecteur de se reporter aux articles de R. J. BOUCHET et de J. DAMAGNEZ (1963).

L'évapotranspiration réelle (ETR) est bien évidemment celle de la plante placée dans son milieu. Elle sera au plus égale à ETP si aucun effet de bord ou d'oasis (1) ne vient perturber son bilan énergétique. Elle se réduira à une faible fraction d'ETP si la plante ne peut s'alimenter convenablement. Nous avons vu dans les paragraphes précédents que cela se produit si la demande instantanée est plus grande que les disponibilités instantanées d'alimentation en eau du sol.

Évapotranspiration et importance de la masse foliaire.

La masse foliaire intervient dans l'évapotranspiration de deux façons :

Étant donné que l'une des principales résistances au passage de l'eau liquide se situe dans la feuille entre les vaisseaux conducteurs et la surface évaporante (cuticulaire ou stomatique), l'accroissement de la masse foliaire facilite la circulation liquide considérée et le débit maximum q_{max} qui peut être assuré par le végétal s'en trouve augmenté.

Sous cet aspect, on serait amené à penser que tout accroissement du LAI (2) est avantageux puisqu'il permet à ETR de se rapprocher de ETP. Ce point a d'ailleurs été confirmé par différents auteurs : ROBELIN (1962) a montré notamment que la réduction de ETR était très importante sur une prairie fraîchement fauchée.

Par contre, les feuilles inférieures recevront une intensité lumineuse d'autant plus faible que le LAI est élevé. Or, au-dessous d'un certain seuil lumineux, le taux d'assimilation nette peut devenir négatif : la respiration devient alors supérieure à l'assimilation photosynthétique. Ainsi s'explique que la courbe donnant, pour des conditions définies, la quantité de matière sèche élaborée en fonction du LAI passe par un maximum (graph. 3).

En fait, le LAI optimal correspondant à ce maximum est susceptible de varier dans des proportions importantes. Il sera d'autant plus élevé bien entendu que l'éclairement en dehors de la culture sera plus intense. Il dépendra en outre de l'espèce végétale : les plantes d'ombre (sciaphytes tolérants ou héliophytes tolérants) auront un point de compensation photosynthétique plus bas et pourront supporter un LAI important dans des conditions d'ombrage partiel par rapport à des plantes de lumière.

Intérêt de l'association.

Ces quelques considérations permettent d'expliquer les avantages possibles de l'association vis-à-vis de la culture pure.

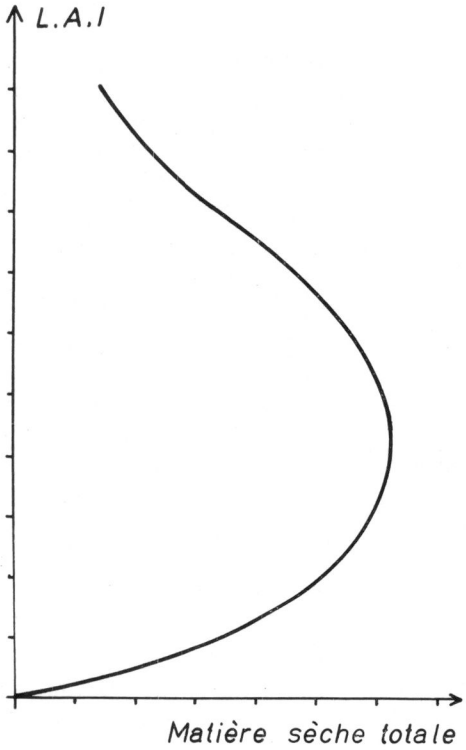
Dans le cas d'une association homogène dont les deux systèmes foliaires sont interstratifiés, on conçoit mal en quoi l'association pourrait favoriser l'alimentation en eau. C'est ainsi que les avantages du mélange dactyle-luzerne, par exemple, s'expliquent par des considérations différentes de celles que l'on vient d'exposer.

Lorsque, au contraire, les deux systèmes aériens occupent des niveaux différents et qu'il devient possible de distinguer une espèce dominée et une dominante (ce qui

(1) On nomme effet d'oasis le fait que l'ETP augmente à mesure que la surface irriguée dans une zone sèche décroît.

(2). Cf note page 499.

est le cas général de l'association étagée du taillis sous futaie à l'association pomme de terre et tournesol), l'association pourra présenter des avantages indéniables. Ces derniers seront d'autant plus nets que le climat sera plus lumineux, la plante dominée étant alors dans des conditions de croissance plus satisfaisantes. Le système pourra en outre offrir un avantage supplémentaire si les deux cultures associées n'ont pas exactement les mêmes besoins en lumière. Ainsi, dans une association de tournesol et de pommes de terre, le tournesol se trouvera semé à grand écartement et profitera pleinement de la lumière. Il pourra ainsi produire près du double par



GRAPH. 3. — *Relation hypithétique entre LAI et matière sèche totale pour une plante annuelle et un climat déterminé* (d'après STERN)

surface effectivement occupée par rapport à une culture pure comparable. La pomme de terre, quant à elle, profitera mieux de la lumière atténuée que des feuilles de tournesol qui recevraient la même intensité lumineuse et donnera aussi, en dépit de ces conditions défectueuses, un rendement assez voisin de celui obtenu en conditions normales (tabl. 6) ou parfois même supérieur par suite de la réduction de l'ETP locale.

Effet d'oasis, vent et association.

Dans le cas d'une zone irriguée dans une région souffrant d'un déficit d'alimentation en eau, on aura augmentation de l'ETP de la zone irriguée. Ces conditions

seront défavorables par rapport à une vaste région bien alimentée en eau ou à une zone à faible radiation.

L'air de l'oasis, par suite des gradients d'humidité et de température avec l'extérieur, aura tendance à être remplacé à un rythme accéléré par de l'air plus chaud et plus sec. Ceci se traduira par une augmentation de la température dans la zone irriguée (cf. l'article sur El-Arfiane). Si les conditions d'aridité et de température sont sévères (Sahara par exemple), on aura non seulement un certain accroissement de l'ETR, mais surtout une *réduction du taux d'assimilation net* (NAR) car la respiration des plantes croît en fonction de la température jusqu'à sa valeur léthale, alors que la fonction chlorophyllienne, après avoir atteint un maximum pour une température donnée (variable avec l'espèce) décroît considérablement. Le rendement en matière sèche par unité de volume d'eau consommée sera réduit.

Pour palier cet effet nocif, il sera nécessaire de cloisonner la zone irriguée non seulement dans le sens horizontal par des brise-vent, mais aussi dans le sens vertical-de façon à avoir des relais d'évapotranspirations successives et à lutter le plus effi cament possible contre l'apport advectif de chaleur. Ceci conduit à envisager une culture dominante à grand écartement, très résistante à la chaleur et ayant son NAR. optimal à une température élevée et des cultures herbacées susceptibles d'avoir une ET instantanée élevée. Ce sera le cas de l'association dattier-luzerne des oasis sahariennes, (ainsi que des abricotiers-cultures maraîchères ou des oliviers-céréale irrigués des oasis syriennes) comme les travaux non encore publiés de M. GIRARD à El-Arfiane le démontrent.

Dans le cas d'une zone tempérée humide, le problème principal est alors qu'en certaines saisons au moins, la radiation globale est faible et peut être insuffisante pour la plante dominée si le couvert est un peu dense. On se trouve alors dans le cas inverse du mulch cité plus haut. Nous avons vu (III-1.1) que l'on peut envisager des méthodes de culture, orientation judicieuse des lignes de plantation notamment. Dans ce cas, l'association fonctionnera à ETP et des irrigations de complément seront souvent nécessaires même en climat humide.

Le vent, qu'on soit en région tempérée ou chaude, aura toujours pour effet de renouveler l'air ambiant rapidement et de modifier l'épaisseur de la couche limite laminaire autour des feuilles (BOUCHET et de PARCEVAUX, 1963). GREGORY (1950) a constaté que, pour une vitesse supérieure à une certaine valeur, les stomates se ferment, ce qui entraîne une réduction de l'ETR et de la photo synthèse.

Il y a donc intérêt à réduire le vent au niveau des cultures. Ceci sera réalisé par des brise-vent (cf. GUYOT) mais aussi au moyen d'associations culturales dans l'intervalle de ceux-ci : l'ensemble cultural aura un coefficient de rugosité élevé et réduira ainsi le vent dans les basses couches.

Humidification de l'air et cultures associées. La réduction de la circulation de l'air permettra à la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère au voisinage du sol de s'élever davantage et les barrières mécaniques des brise-vent réduiront les échanges avec l'extérieur. Le déficit de saturation pourra être réduit de façon notable en région aride (cf. l'étude sur El-Arfiane).

Cette vapeur d'eau limitera les déperditions de chaleur nocturnes et les écarts de température pourront se trouver modifiés si la zone d'oasis est assez vaste.

2.4. *Réalimentation artificielle du sol en eau*

Toutes les considérations précédentes font ressortir l'absolue nécessité d'une alimentation optimale de l'ensemble de l'association et les auteurs qui ont étudié ce problème dans cette optique sont unanimes à en souligner l'importance fondamentale.

Ceci conduit à des conceptions nouvelles en matière d'alimentation en eau et en fertilisation : il est nécessaire d'une part que l'ensemble ne souffre à aucun moment de malnutrition ; les apports doivent être faits en fonction des besoins et ceux-ci sont sous la dépendance essentielle de l'évapotranspiration potentielle de la région (et donc du rayonnement solaire) et du volume radiculaire de l'ensemble.

Les apports d'eau devront être plus fréquents si l'ETP est plus élevée et si a plante a un système radiculaire dense et superficiel, plus abondants si la profondeur explorée par les racines est grande. Ces conditions doivent guider le rythme de l'apport d'eau : l'arrosage d'un gazon en climat désertique entraîne des pertes intenses par évaporation directe. On peut alors envisager l'irrigation nocturne.

Dans le cas d'une association dont les besoins en eau sont très différents et les systèmes radiculaires bien répartis dans le profil (graminée-arbre fruitier par exemple) on pourra effectuer des arrosages fréquents et réduits pour la graminée et, une fois sur deux ou trois, une irrigation abondante rechargeant tout l'ensemble du profil.

Il ne s'agit ici que d'exemples très généraux et chaque cas particulier devra être étudié avec soin sous peine d'aboutir, soit à des pertes en profondeur, soit à des déficits plus ou moins marqués. D'autre part, les apports d'engrais devront être étudiés tout spécialement dans chaque cas.

On peut cependant dire que, pour une région déterminée, on n'aura à envisager qu'un nombre limité de facteurs : profondeur et fertilité, type du sol ; profondeur de la nappe phréatique ; type d'association envisagé (notamment vis-à-vis de l'enracinement) ; alimentation en eau ; répartition des pluies et modes d'irrigation possibles.

Nous allons examiner avant de conclure, quelques expériences intéressantes de cultures associées qui illustreront certains aspects envisagés ci-dessus.

IV. — QUELQUES EXEMPLES D'ÉTUDES D'ASSOCIATIONS

Nous n'avons retenu q'un petit nonbre d'exemples portant sur des types d'associations intéressants qui groupent des plantes de familles diverses.

Le choix très limité auquel nous nous sommes arrêté est extrêmement arbitraire et critiquable. Nous avons cherché nos exemples à des latitudes aussi variées que possible et avons retenu des associations très différentes entre elles, soit homogènes (2 plantes annuelles) soit hétérogènes (arbres fruitiers et cultures herbacées).

Nous avons comparé le rendement de chaque culture en fonction de la surface relative qu'elle occupe dans l'ensemble puisque, par définition, des plantes différentes croissent sur cette même surface. Dans ces conditions, on peut juger des avantages ou des inconvénients de l'association.

1. — Associations homogènes (au sens précisé au chapitre II)

Les exemples portent sur des mélanges Légumineuses et Graminées (Guliaev, 1962 ; Evans, 1960) ou autre famille (Evans, 1961) ou entre deux plantes non Légumineuses (Crocioni, 1951 ; Bringman, 1955). Nous n'étudierons pas ici d'exemple de fourrage associé du type luzerne-dactyle, mais nous désirons souligner que l'intérêt de ce type d'association nous paraît grand. Nous l'omettons ici parce qu'il est l'exemple généralement le mieux connu.

TABLEAU 2

Densité de semis

	Mwanhala				Ilonga			
	Sorgho		Arachide		Maïs		Arachide	
	Culture pure	Culture associée	Culture pure	Culture associée	Culture pure	Culture associée	Culture pure	Culture associée
Densité H	54 300	79 300	135 800	114 800	28 400	28 400	69 000	61 200
M	42 300	42 300	92 800	92 200	22 200	22 200	50 400	50 400
F.....	41 500	28 900	72 500	68 600	15 300	15 300	40 700	37 800

TABLEAU 3

*Maïs-Arachide. Rendements grains (q/ha) Ilonga**

Densité de semis		Association 1 ha		Culture pure 1/2 ha	
Maïs	Arachide	Maïs	Arachide	Maïs	Arachide
F	F	*18,9*	*4,65*	9,7	4,65
	M	*19,35*	3,15		
	H	*20,20*	2,3		
M	F	*24,4*	*5,00*	14,7	4,10
	M	*24,0*	*4,15*		
	H	*26,1*	2,15		
H	F	*31,6*	*6,1*	16,6	4,05
	M	*30,2*	3,9		
	H	*28,5*	3,15		

* Les rendements en italique sont supérieurs à ceux de la culture pure pour le niveau correspondant : ex, l'association Sorgho à faible densité-arachide à haute densité (4,38 + 11,22) est supérieure aux composants purs (3,62 + 8,75).

Guliaev (1962), en Ukraine, a associé du maïs à du soja, de la *Vigna sinensis*, de la gesse, de la vesce et des haricots. Certaines associations sont favorables (maïs-soja ou haricot par exemple et d'autres sont défavorables (maïs-vesce). Les mêmes

essais ont été conduits par Hugues (1962) dans le midi Languedocien, mais dans les conditions de culture où il s'est placé, il conclut à l'inefficacité de l'association. GIRENKO (1962) souligne l'intérêt de celle-ci pour les ensilages. Certaines associations sont nettement supérieures à d'autres et on s'en rend compte en calculant le rendement de chaque plante au prorata de la surface qu'elle occupe dans le mélange.

TABLEAU 4

Sorgho-Arachide (q/ha) Mwanhala

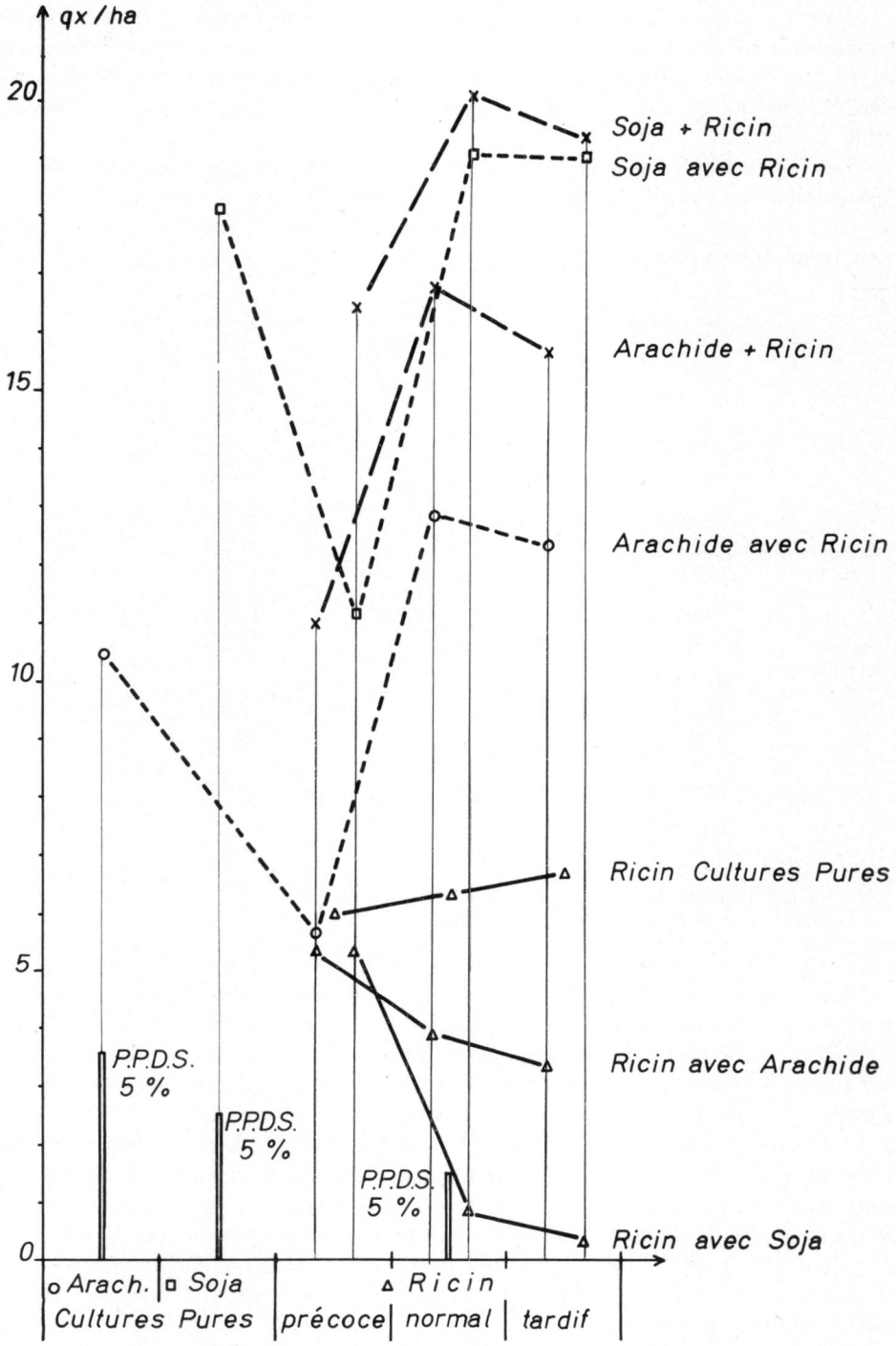
Densité de semis		Association 1 ha		Culture pure 1/2 ha	
Sorgho	Arachide	Sorgho	Arachide	Sorgho	Arachide
F	F	*4,15*	*9,35*	3,62	8,75 8
	M	2,48	*13,30*		
	H	*4,38*	*11,22*		
M	F	*4,82*	*10,60*	3,62	8,75
	M	*5,27*	*11,35*		
	H	*4,90*	*12,75*		
H	F	*8,53*	*8,77*	3,62	8,75
	M	*5,27*	8,55		
	H	*5,05*	9,73		

Les rendements en italique sont supérieurs à ceux de la culture pure pour le niveau correspondant : ex. l'association Sorgho à faible densité-arachide à haute densité (4,38 + 11,22) est supérieure aux composants purs (3,62 + 8,75).

TABLEAU 5

Rendements d'1 ha de culture par rapport à 2 demi-hectares de culture pure (d'après EVANS et SREED-HARAM, 1960)

	Rendements kg/ha					Différence de rendement		
	Ricin			Arachide	Soja	Ricin	Arachide	Soja
	Précoce	Normal	Tardif					
1°) *Culture pure :*	300	312	336	525	905			
2°) *Associations :*	533			560		+ 233	+ 35	
Ricin-Arachide		393		1 285		+ 80	+ 760	
			331	1 231		— 5	+ 706	
	530				1 114	+ 230		+ 209
Ricin-Soja		90			1 914	— 222		+ 1 009
			29		1 907	— 307		+ 1 002



GRAPH. 4. — *Association du Ricin au Soja et à l'Arachide pour trois dates de semis du Ricin, Soja et Arachide étant dans tous les cas semés en même temps que le Ricin précoce*

EVANS (1960) au Tanganyika, dans les stations de Mwanhala et Ilonga, associe le maïs ou le sorgho à l'arachide (tabl. 2, 3 et 4). Il compare toujours le rendement d'1/2 ha de chaque culture pure à celui d'1 ha d'association avec 3 densités de semis pour chaque plante : H = Densité élevée ; M = Densité moyenne ; F = Densité faible.

Les faibles rendements de maïs de pays en culture pure sont très améliorés par l'association avec l'arachide ; de même les rendements des densités de semis moyenne ou forte d'arachide sont améliorés par l'association avec les densités faible ou moyenne de sorgho.

TABLEAU 6

Association de Maïs et de Tournesol à des Pommes de Terre.
Rendement q/ha

	Culture pure		Associations	
			Tournesol	Maïs
Pommes de terre	Tubercules prégermés = P Tubercules normaux = N	188,0 187,0	219,0 (1) 163,0	272,0 (2) 221,0 (1)
1° lignes rapprochées	Tournesol P Tournesol N	10,7	17,25 21,0	
	Maïs P Maïs N	45,0		25,21 (2) 28,5 (2)
2° lignes espacées	Pommes de terre normales		162,0	183,0
	Tournesol		22,5 (1)	
	Maïs			31,83 (2)

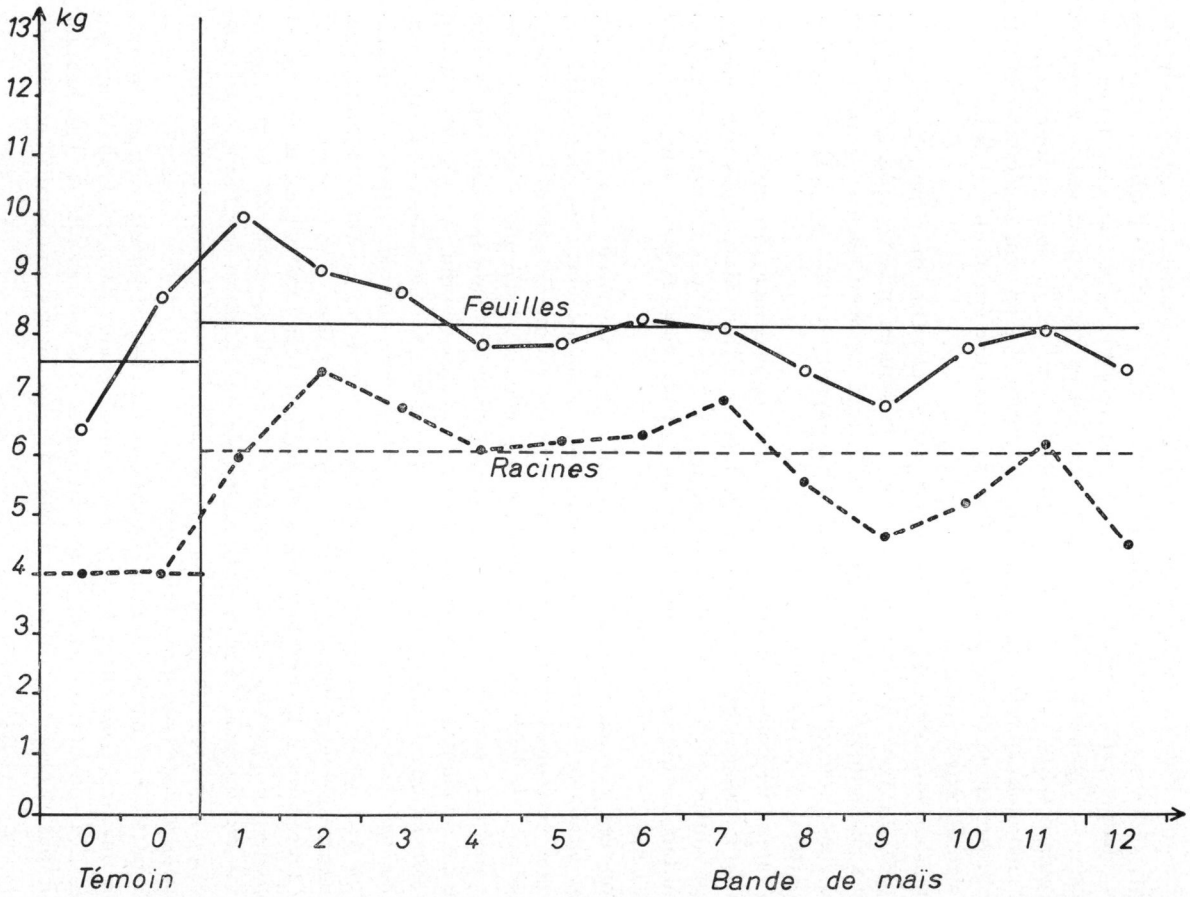
(1) Valeurs significativement différentes du témoin à 5 % ;
(2) Valeurs significativement différentes du témoin à 1 %.

En 1961, EVANS a comparé Ricin, Soja et Arachide en association et en culture pure. Le graphique 4 traduit cette comparaison. L'association arachide-ricin est nettement favorable alors que soja-ricin abaisse trop le rendement en ricin. Les cultures pures ont été données pour 1 ha chacune. La comparaison des rendements à surface équivalente est données au tableau 5.

Dans tous les cas, les besoins en eau ont été couverts de façon satisfaisante mais à Ilonga, le sol était plus fertile. Les rendements obtenus en culture pure sont représentatifs de ceux qu'on obtient généralement dans la région, ce qui souligne l'intérêt de l'association. L'alimentation minérale a pu jouer le rôle de facteur limitant.

CROCIONI (1951) dans la région de Bologne, a associé la pomme de terre au maïs et au tournesol, en sol très fertile, dans des conditions de déficit en eau important mais d'ampleur non précisée.

Ces résultats sont donnés dans le tableau 6 qui permet la comparaison par unité de surface de chaque culture.



GRAPH. 5. — *Poids de racines et de feuilles de lignes de 5 m de betteraves prélevées au hasard dans chaque bande* (1 *à* 12) *et dans les témoins* (0)
Moyenne de 3 à 6 échantillons par bande. PPDS : Témoin. Racines ± 0,27 kg Essai. Racines. ± 0,21 kg
Les droites horizontales représentent les moyennes.

L'effet améliorant de l'association pomme de terre-tournesol est incontestable surtout pour le tournesol. Celui de l'association pomme de terre-maïs pour la pomme de terre est également important. L'essai a été conduit avec un maïs de pays à 67 000 pieds/ha, en culture associée, 57 000 en culture pure ; le tournesol : 35 500 en culture associée, 25 000 en culture pure ; les pommes de terre à 48 000 pieds/ha dans tous les cas, chaque valeur ramenée à l'ha de culture pure. L'association « lignes rapprochés » correspond à 1/3 de maïs ou tournesol et 2/3 de pommes de terre ; les lignes espacées à 90 p. 100 de pommes de terre, 10 p. 100 de maïs ou tournesol.

Remarquons que la densité globale de culture est un peu supérieure dans le cas de l'association, ce que nous considérons comme une erreur du fait de la pénurie d'eau signalée par l'auteur.

Dans un essai effectué en Allemagne (vallée inférieure du Rhin), BRINGMANN et KAISER (1955) ont associé des betteraves à du maïs en brise-vent. Le graphique 5 traduit l'amélioration du rendement en racines et feuilles (fraîches) de betteraves dans la zone protégée par le maïs (1 à 12) par rapport au témoin (0). Cette amélioration atteint 50 p. 100 en moyenne.

L'auteur ne donne malheureusement pas le rendement du maïs. De toutes façons, le rendement en betteraves par hectare de surface brute (maïs non déduit), est supérieur de 30 p. 100 à celui du champ en sol nu, la maïs couvrant 20 p. 100 de la surface. Ce qui montre que l'opération était bénéfique *même* avec un *rendement nul* en maïs.

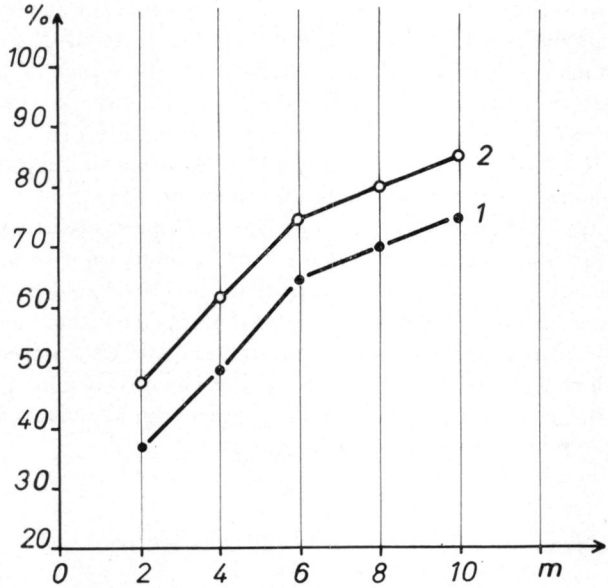
Tous ces exemples, résumés avec une brièveté qui ne permet pas d'en rapporter tous les détails, montrent néanmoins que l'association a souvent un effet bénéfique, mais que certaines plantes sont favorisées alors que d'autres en souffrent. D'autre part, les différents auteurs qui se sont précocupés d'étudier l'association ne se sont pas assez souciés d'assurer une alimentation optimale spécialement étudiée dans le cas de plantes entrant en compétition. La date de semis des plantes entrant dans l'association est importante : le ricin, l'arachide et le soja précoces ont été semés ensemble, les ricins « normal » et « tardif » l'ont été dans une végétation établie d'arachide ou de soja, ce qui peut expliquer les effets dépressifs, constatés aussi dans des semis mixtes de moutarde et maïs en 1962 à Versailles.

Si une plante a un développement en hauteur plus rapide que l'autre (cas du maïs vis-à-vis des pommes de terre normales de l'étude de CROCIONI ou de la moutarde vis-àvis du maïs) la plante la plus rapide à tendance à étouffer la plus lente si celle-ci n'a pas une physiologie lui permettant de surmonter cette difficulté (cas de la vesce dans l'association vesce-avoine).

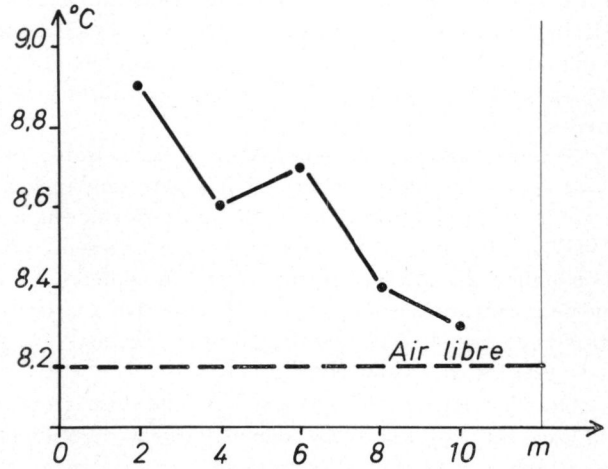
En outre, les densités de semis exagérées ont un effet dépressif très net. On peut en tirer une première conséquence bien connue d'ailleurs dans le cas des fourrages associés : la somme des densités de peuplement des composants de l'association ne doit pas dépasser la densité normale de chacun des composants en culture pure.

Chaque plante, nous l'avons vu précédemment (III-23), a un LAI optimal, lui permettant d'assurer le plein emploi des conditions dans lesquelles elle est placée (température, rayonnement, évapotranspiration potentielle, vitesse de déssechement du sol). Les conditions sont malgré tout assez constantes dans le cas de la majorité des plantes cultivées et une densité à l'hectare optimale peut être définie dans ces conditions : le rendement plafonne ou même décroît quand on dépasse celle-ci

c'est-à-dire qu'un semis de maïs dont l'optimum local est de 60 000 pieds/ha ne doit pas arriver à 90 000 pieds/ha ramené à la surface nette couverte une fois mis en association. Ceci a très souvent été oublié par les expérimentateurs dont nous avons



GRAPH. 6 *a*. — *Évaporation en pourcentage de celle à l'air libre, entre les bandes de maïs.*
Distances en mètres
(1) Vents de SW, humidité 84,3 p. 100,
(2) Vents de S et d'W, humidité 78,2 p. 100.



GRAPH. 6. *b*. — *Températures minimales entre les bandes de maïs. La ligne en pointillé donne le minimum à l'air libre*

pu consulter les travaux. L'effet est d'ailleurs d'autant plus nocif que les deux plantes ont un développement plus semnblable ou que l'une des plantes est grimpante (haricot-maïs par exemple).

Quand des conditions favorables à l'association sont réunies, celle-ci marque alors son influence heureuse.

BRINGMANN et KAISER ont particulièrement étudié l'effet de brise-vent de l'association et le graphique (6*a*) traduit l'effet du maïs sur l'évapotranspiration de la betterave à différentes distances des bandes de maïs et sur les températures minimales par rapport à celles de l'air libre (6*b*). L'article de GUYOT (1963) explicite tous les phénomènes en liaison avec les brise-vent et permet de penser que cet effet ne s'est pas fait sentir dans le cas de l'essai de CROCIONI à grand écartement. On peut penser que les bandes étaient orientées de telle façon qu'elles n'ont pu constituer un abri, alors qu'à faible écartement le coefficient de rugosité de la surface a permis une réduction de la vitesse de renouvellement de l'air.

Outre ces effets (LAI, brise-vent...) on peut expliquer aussi ce phénomène par la réduction de la vitesse de dessèchement du sol en fonction du temps dH/dt dont nous avons parlé en III-2.2 : l'association de deux plantes dont les systèmes radiculaires ont tendance à croître à des niveaux différents peut augmenter le volume de sol prospecté à chaque instant et donc fournir une alimentation meilleure à l'ensemble surtout dans le cas où les ETP globales sont élevées : chaque plante de l'association pourra plus aisément atteindre l'ETP partielle que les conditions climatiques (lumière et température notamment) lui imposent.

2. — ASSOCIATIONS HÉTÉROGÈNES

L'association au peuplier d'une série de cultures annuelles est généralement regardée comme favorable : la répétition de sarclage dans la culture associée et les labours d'automne obligent le peuplier, arbre à racines fasciculées, à coloniser le sous-sol si celui-ci s'y prête. On obtient alors une utilisation maximale du sol. Si ceui-ci est mal drainé, on trouve une prairie de graminées aux racines superficielles associeé à la peupleraie : l'accroissement optimal du peuplier étant obtenu quand celui-ci est planté à grand écartement, il est nécessaire d'utiliser le sol entre les rangs les premières années.

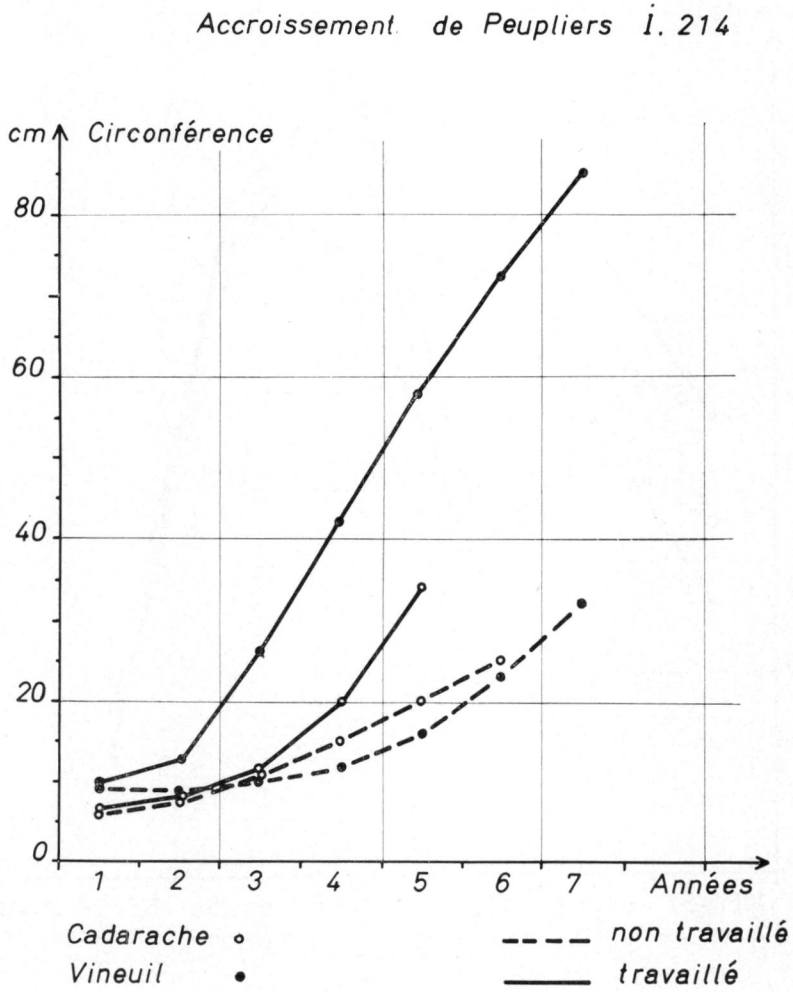
La plantation d'une luzerne est généralement défavorable car son système radiculaire profond concurence le peuplier qui n'a plus tendance à s'enraciner en profondeur ; en outre, sa production d'azote en fin de saison empêche l'aoûtement du bois (F. A. O., 1956 ; POURTET, 1961). Le graphique 7 présente pour deux régions de France l'accroissement d'I 214 en sol travaillé et en jachère.

Le problème de la culture sous vergers ou de l'enherbement de ceux-ci a souvent été abordé, notamment par BLONDEL (1954, 1959), DAVISON (1951), P. LARUE (1954), PATT (1956), SAKAMOTO (1960), etc.

Nous avons donné les résultats de PATT sous forme d'un graphique (graph. 8), montrant que la non-culture avec enherbement fauché régulièrement ne réduit nullement les rendement quand elle est entreprise avec prudence. BLONDEL (1959) arrive à la conclusion que, sur mandarinier en Algérie, l'amélioration des rendements atteint 30 p. 100, alors que pour DAVISON, la même méthode, appliquée en Australie, amène une baisse de rendement. Mais nous avons vu précédemment (III-1.2 et III-2.1) quelle explication on peut donner aux phénomènes de retard de végétation.

On s'accorde généralement à reconnaître que la consommation d'eau de l'en-

semble pendant la période chaude reste sensiblement la même que dans le cas d'un verger en sol nu. Les engrais verts d'hiver, par contre, consomment une quantité d'eau très supérieure à celle évaporée par le sol nu durant la même période (MAUME, 1946). SAKAMOTO a étudié le DPD de diverses plantes associées à un verger de manda-



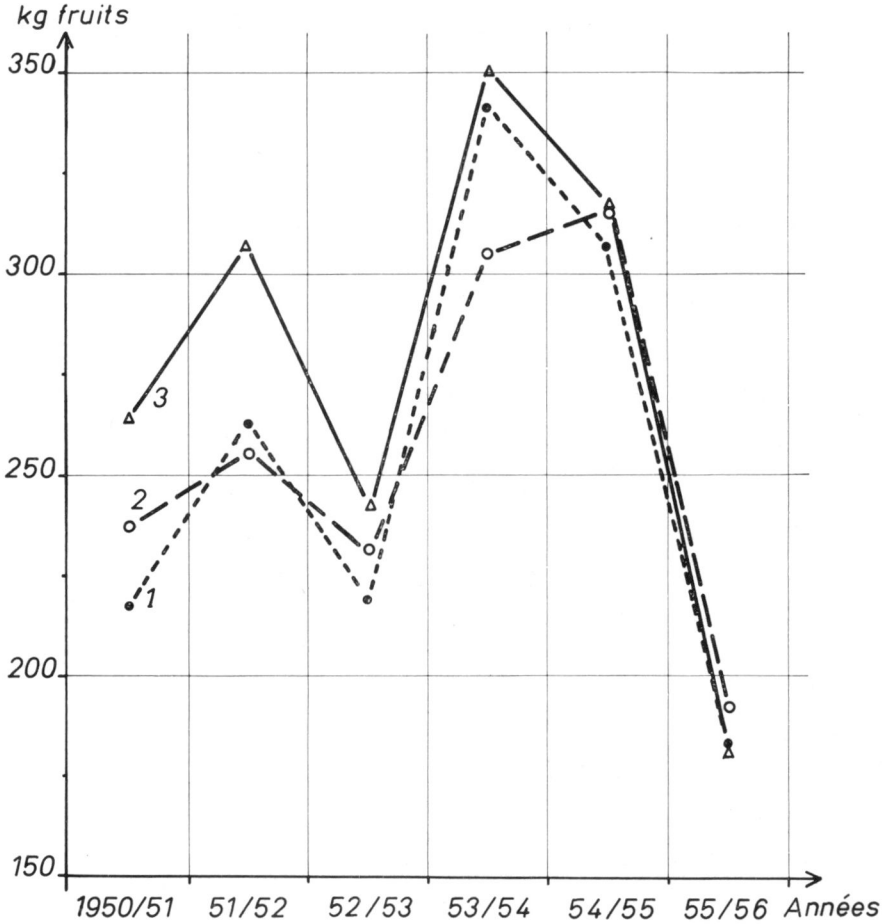
GRAPH. 7. — *Influence du travail du sol sur la croissance du Peuplier* (d'après POURTET, 1961)

riniers *Satsuma*, et a constaté de grandes différences dans le point de flétrissement. Le trèfle *Ladino* est plus sensible que le mandarinier, la Lespedeza et les graminées moins sensibles. Ceci est important, car on peut s'expliquer pourquoi des résultats contradictoires sont obtenus à la suite de périodes de déficit en eau, l'herbe souffrant plus ou moins que l'arbre selon les espèces.

Dans ce cas, comme dans celui des cultures homogènes, l'engrais vert ou l'enherbement permanent seront favorables à condition d'alimenter convenablement, à

tout moment, l'ensemble de l'association en éléments organiques, minéraux et en eau.

Ceci est particulièrement vrai dans le cas des cultures associées du Roussillon (BOULAY, 1953) où les agriculteurs exportent pratiquement toute leur production et pratiquent des associations intensives même dans des sols non irrigables comme les vignes complantées d'arbres fruitiers que la législation interdit d'arroser. L'appauvris-



GRAPH. 8. — *Rendement moyen par arbre (Pomélo) en fonction du mode de culture du sol*
(1) Labouré (2) Herbes arrachées (3) Végétation spontanée fauchée

sement excessif des sols n'est pas compensé par des restitutions suffisantes et certaines plantes moins résistantes ou moins bien adaptées à l'association, peuvent en souffrir considérablement. C'est aussi le cas des vergers normands qui, souffrant de la sécheresse en été, sont constitués de mauvaises variétés de pommiers et de pâturages dégradés (donnant seulement 2 000 à 3 000 UF par an). Cet état de choses dont on rend l'association responsable doit être en réalité imputé à des méthodes culturales inadaptées.

Nous ne nous étendrons pas plus sur ces exemples qui nous permettent simplement d'illustrer les idées que nous avons développées au cours des chapitres précédents.

3. — Cas des oasis

Dans le cas des oasis, les exemples chiffrés manquent malheureusement le plus souvent. Nous avons eu cependant l'occasion à plusieurs reprises d'étudier ces problèmes tant au Moyen-Orient qu'au Sahara et dans le Delta du Nil, et nous sommes convaincus de la supériorité de l'association d'une culture herbacée à la strate arborée de l'oasis sur la culture en sol nu prônée par certains techniciens.

Dans ces régions, en effet, l'insolation importante pendant toute l'année (nous sommes au sud du 35e parallèle) permet un LAI élevé, supérieur aux 40 000 M^2/ha des céréales. On peut associer deux couvertures végétales superposées dont l'une, l'arbre, (Dattier, Olivier, Abricotier, Peuplier...), est très résistante à des conditions climatiques sévères, températures élevées et rayonnement global important, et l'autre, à des exigences plus modérées en lumière, mais souffre si elle est placée dans une atmosphère ayant un déficit de saturation trop important (cas de la plupart des solanées par exemple). Nous avons pu noter en Syrie des rendements en blé honorables (25 q/ha en surface brute) avec une production intéressante d'abricots sur le même sol. Cet effet bénéfique s'explique aisément par les valeurs très élevées de l'évapotranspiration potentielle (l'évaporomètre Piche évapore plus de 10 mm par jour dans ces conditions). La coalition des diverses plantes associées au sein d'une oasis de dimension suffisante permet à chacune de fournir sa quote-part à l'ETP très élevée de l'ensemble, puisque deux systèmes radiculaires et deux systèmes foliaires à peu près indépendants répondent à un pouvoir évaporant prédéterminé de l'air ; si l'alimentation en eau est convenable (et il est plus facile d'amener une quantité importante d'eau sur une surface limitée que peu d'eau sur de grandes surfaces dans les conditions désertiques), la productivité de celle-ci sera très améliorée car la partie de l'eau évaporée en pure perte par chaque plante pour rétablir son bilan thermique est utilisée à la production de matière sèche, but final de toute culture.

Dans l'oasis d'El-Arfiane dont nous parlons par ailleurs un effet très positif de l'association palmier-jardin a été enregistré : non seulement la production des arbres est augmentée mais en outre, on obtient une production maraîchère très notable.

Nous allons maintenant nous efforcer de tirer les conclusions de cette étude et envisager les principaux points qui méritent de donner lieu à des expériences mieux analysées.

V. — ESSAI DE SYNTHÈSE

Au cours des chapitres précédents, nous avons envisagé les types d'associations, les facteurs intervenant et quelques exemples pris sous des climats différents. Nous essayerons maintenant d'en faire une synthèse et de voir quels enseignements en tirer pour des recherches futures.

Soulignons tout d'abord le caractère universel des cultures associées. A toutes les époques, des hommes ont cultivé ensemble des végétaux différents. Cela ne doit pas surprendre, car l'association est de règle dans la nature, le peuplement pur étant l'exception.

Aspects positifs de l'association

L'alimentation des plantes en eau et en éléments minéraux et l'utilisation de la lumière sont intimement liées. Chaque espèce a un coefficient optimal de recouvrement de la surface du sol. Mais ce recouvrement varie dans de grandes limites et une plante isolée, recevant la lumière par toutes ses faces, pourra avoir un LAI très supérieur à celui qu'elle aurait eu dans un ensemble végétal. C'est ainsi que celui d'un champ de blé ou de maïs sera de l'ordre de 4/1 alors que celui d'un plant isolé d'oranger pourra être beaucoup plus élevé. Dans le cas de l'association, l'ensemble pourra avoir un LAI supérieur à celui des cultures pures, notamment si les plantes associées occupent des strates différentes (pommes de terre et tournesol par exemple) ; le LAI de la culture dominée pourra atteindre 3 ou 4 ; la culture dominante, généralement moins dense, pourra atteindre 1 ou 2, compte tenu de l'étagement des feuilles ; mais en surface relative couverte par chaque culture, l'ensemble sera plus élevé que celui de chacune des cultures pures.

Dans le cas de fourrages associés homogènes intimement mêlés comme la vesce-avoine, le phénomène est moins visible. L'enroulement de la légumineuse autour de la graminée doit cependant augmenter le LAI par rapport à celui de la graminée pure ; ce coefficient est en tous cas supérieur à celui de la vesce pure qui, rampante, est incapable de s'établir sur plusieurs niveaux.

Un problème mal résolu encore est de connaître l'utilisation de la lumière par les différents niveaux et de savoir si le seuil du NAR est atteint à la base de la culture ; le jaunissement des feuilles de base dans des semis denses en climat peu lumineux laisse penser que la lumière y est insuffisante. Par contre, dans un verger d'agrumes engazonné, le LAI atteindra des valeurs très élevées, le climat étant assez lumineux même en hiver.

L'eau pose vis-à-vis des racines le même problème que la lumière pour les feuilles ; chaque plante a une potentialité d'édification d'un système radiculaire en fonction de ses capacités génétiques (racines pivotantes ou fasciculées, enracinement dense ou extensif...), du sol où elle se trouve et des réserves en eau de celui-ci. L'association de deux plantes aux potentialités très différentes (comme une graminée et une luzerne ou une betterave et un maïs) permettra généralement de coloniser plus intensivement un plus grand volume de sol.

Nous avons vu que cela revient à mieux utiliser les réserves en eau de l'ensemble du profil et à alimenter mieux et plus longtemps un ensemble cultural donné dans des conditions d'évapotranspiration déterminées.

L'évapotranspiration réelle de la culture doit à tout instant être aussi voisine que possible de l'évapotranspiration potentielle du lieu, elle-même en liaison avec la radiation globale et le déficit de saturation de l'atmosphère. Si le LAI croît, jusqu'à un certain optimum tout au moins, l'ETP ponctuelle (par unité de surface foliaire) sera réduite pour des conditions extérieures données. D'autre part, une masse de feuillage importante pourra évaporer beaucoup d'eau à chaque instant si l'alimentation par le sol est suffisante et tendra à utiliser tout le rayonnement, ce qui évitera un échauffement excessif des surfaces foliaires et leur permettra de synthétiser dans les meilleures conditions de température. Celles-ci varient d'ailleurs avec les espèces.

L'association de cultures de hauteurs différentes aura en outre un effet de brise-vent important pour la culture dominée, comme pour la culture dominante, en

raison du coefficient de rugosité plus élevé de l'ensemble. Des rangs de maïs dans un champ de betteraves, par exemple, parce que plus espacés, produiront un effet de rugosité plus grand qu'un champ homogène : des tourbillons se produiront entre chaque rang et l'ensemble créera des conditions de microclimat tendant à homogénéiser l'atmosphère au niveau de la culture (mouvements verticaux) et à freiner les échanges avec l'extérieur, d'où une réduction du déficit de saturation et des conditions favorables à une photosynthèse plus active.

Ces potentialités ne seront utilisées par la plante que si celle-ci trouve dans le sol une nutrition minérale adaptée à des besoins instantanés accrus. Ce qui amènera à surveiller les alimentations hydrique et minérale et la teneur en matière organique du sol.

Parmi les avantages indirects de l'association, nous voyons la protection des sols en régions érosives, l'amélioration de leur structure et la conservation d'un taux satisfaisant de matière organique lorsque l'une des cultures laisse sur place d'abondants débris, ou s'il s'agit de plantes développant chaque année un important système radiculaire de-novo, équivalant à l'enfouissement d'une masse de matière organique de plusieurs tonnes.

Aspects négatifs de l'association

Deux plantes, ayant pratiquement le même mode de vie (enracinement comparable en profondeur et densité à chaque niveau, exigences en lumière, etc), s'accorderont mal. Il en sera de même si une plante sécrète des substances toxiques pour l'autre ou si les possibilités d'absorption d'éléments minéraux de l'association sont trop différentes. Les résultats seront alors négatifs.

C'est ainsi que la luzerne produit de l'azote en arrière-saison et empêche l'aoûtement du bois de peuplier, ce qui affaiblit celui-ci à l'entrée de l'hiver. Une plantation trop dense en culture pure aurait les mêmes effets : des peupliers serrés ont un taux d'accroissement annuel qui plafonne très rapidement du fait de la concurrence entre les éléments de la population. En aucun cas association ne doit signifier exagération des densités de plantation : ramenées à l'hectare de culture pure, elles doivent correspondre à l'optimum variétal dans les conditions de la région.

Très généralement, toute insuffisance de l'un des éléments du milieu conduit à une concurrence néfaste. En ce qui concerne les engrais on signale le blocage d'un ou plusieurs éléments par certaines plantes : on a de véritables antagonismes variétaux et il sera préférable de ne pas les associer entre elles. Mais il s'agit très souvent de blocages temporaires : des fumures abondantes et répétées appliquées pendant plusieurs années, de préférence *avant même de commencer l'association*, élimineront ces effets.

Dans le cas de levées échelonnées des différentes cultures, certaines plantes sont susceptibles de résister à la concurrence de végétaux déjà développés, car elles ont des besoins limités en lumière à leurs premiers stades. D'autres, comme le ricin ou le maïs, en sont incapables et présentent un étiolement, provisoire ou définitif, ce qui se traduira finalement par une baisse de rendement.

Il sera nécessaire d'en tenir compte pour choisir les dates de semis, sans oublier par ailleurs les vitesses de croissance des plantes les unes par rapport aux autres dans un milieu donné.

Dans d'autres cas, comme les prairies sous vergers, la densité du chevelu radiculaire superficiel et l'accumulation des débris sont tels qu'ils forment un paillasson imperméable nuisant à la pénétration de l'eau et des engrais. Ce sont généralement de vieilles pâtures formées trop souvent d'espèces sans valeur ; on peut penser que l'association n'est pas en cause, mais bien le mode de culture (ou plutôt l'absence de culture) : sous prétexte de ne pas détruire le système radiculaire superficiel de l'arbre, il ne faut pas arriver paradoxalement à l'affamer.

Le problème de la compétition pour l'eau peut généralement être résolu par l'irrigation.

Tout ceci permet de comprendre que la même plante puisse admettre la compétition dans certains cas et avoir une mauvaise croissance dans d'autres. Des études *systématiques* sur les possibilités d'association sont à entreprendre ; nous n'en avons trouvé qu'un petit nombre dans la littérature. Chaque fois que l'équilibre biologique n'est pas atteint dans une association culturale, on verra apparaître des déséquilibres qui se traduiront par des phénomènes de compétition et de domination de l'un des éléments.

CONCLUSIONS

En résumé, nous avons tenté d'envisager l'ensemble des problèmes que pose l'association, ses avantages et ses inconvénients.

Nous pensons qu'après avoir connu une période de modernisation extensive (engrais, matériel agricole, rationalisation des techniques), l'agriculture doit s'intéresser à des techniques d'intensification, surtout dans les régions à forte population rurale : augmentation du nombre des récoltes et des rendements sur un même sol grâce à l'irrigation. Il faut se préoccuper aussi des potentialités photosynthétiques de la région : les plantes utilisent souvent moins de 1 p. 100 de la radiation globale pour la photosynthèse, alors que théoriquement, (NICHIPOROVITCH, 1962 *b*) la proportion utilisée pourrait atteindre 20 à 25 p. 100. La réduction des échanges latéraux par des brise-vent et l'utilisation maximale des potentialités d'alimentation de la plante par le sol permettraient une amélioration considérable des rendements. Tous ces facteurs doivent être pris en considération et, notamment, les techniques de cultures associées (jouant le rôle de brise-vent) méritent d'être étudiées.

Reçu pour publication en avril 1963.

SUMMARY

ASSOCIATED CROPS AND WATER UTILIZATION

In investigating how to improve water utilization in modern agriculture, the possibilities offered by a continuous or alternate soil cover had been studied.

These studies were based on the hypothesis that the water nutrition of plants is governed by the potential evapotranspiration of the habitat and by the availability of soil moisture in the rhizosphere, and is limited by the capacity of actual evapotranspiration of different plants so that

any deficiency is reflected in a decrease of actual evapotranspiration to a level below the potential evapotranspiration.

This suggests that associated crops would, by their better exploration of the soil and by their greater leaf surface, reduce evapotranspiration per surface unit of the habitat, thus improving the water nutrition and photosynthetic activity as a whole.

An attempt was made at classifying crops associations mentioned in the literature, and the different climatic, soil and biological factors exerting a favourable or harmful effect on them had been studied.

It was endeavoured to use certain bioclimatic concepts for the interpretation of often contradictory and fragmentary results published in the literature.

The study, besides throwing some light on phenomena not specifically investigated in this paper, confirmed the hypotheses originally assumed, and shows under what conditions the crops associations may serve for the set task of improving water utilization.

ZUSAMMENFASSUNG

MISCHKULTUREN UND PRODUKTIVITÄT DES WASSERS

Die allgemeine Richtlinie des Untersuchungen über Verbesserung der Produktivität des Wassers in der modernen Kultur führte zum Studium der Möglichkeiten die eine Bodenbedeskung, sei sie fortlaufend oder gestuft, eröffnen mag.

Diese Studien gingen aus von der Annahme, nach der die Wasserversorgung der Pflanzen durch die potentielle Evapotranspiration regiert wird, sowie durch das für die Wurzeln verfügbare Bodenwasser, begrenzt durch die Möglichkeiten der sofortigen Evapotranspiration der verschiedenen Pflanzen, bei der jede ungenügende Versorgung sich durch Reduktion der wirklichen Evapotranspiration unter die potentielle bekundet.

Dies führt uns zur Annahme, dass die assozierten Kulturen durch bessere Erkundung des Bodens und grössere Blattfläche die lokale sofortige Evapotranspiration pro Flächeneinheit verringert, und so eine bessere Wasserversorgung und ein bessere Photosynthese sichert.

Wir versuchten eine Klassifizierung der in der Literatur verzeichneten assozierten Kulturen, mit Studium der verschiedenen klimatischen, edaphischen und biologischen Faktoren, die in guter oder schlechter Richtung auf die einwirken.

Wir erstrebten, mittels bioklimatischer Auffassungen die oft sich widersprechenden und unvollständigen Resultate der Literatur auszulegen.

Dieses Studium, das ausserdem einige andere Erscheinungen herauszustellen vermochte als die untersuchten, bestätigt im grossen und ganzen unsere ursprünglichen Annahmen, und zeigt, unter welchen Bedingungen die Assoziationen dem gesuchten Ziel, d.h. Verbesserung der Produktivität des Wassers, näherkommen.

РЕЗЮМЕ

Совместные культуры и продуктивность влаги.

К. БАЛЬДИ (Версаль).

По заданиям генеральной линии исследований улучшения продуктивности влаги в современном хозяйстве автор провел изучение возможностей предоставляющихся постоянным или послойным покровом почвы.

Исходным пунктом этого изучения являлась гипотеза, по которой, местная потенциальная эвапотранспирация и количество влаги предоставленное растению на уровне корневой системы, управляют его водным питанием, ограничивающимся в свою очередь возможностями мгновенной эвапотранспирации различных растений; при этом — малейший недостаток влаги вызывает падение уровня реальной эвапотранспирации ниже уровня потенциальной.

Это заставило автора предположить что совместные культуры уменьшают местную мгновенную эвапотранспирацию единицы поверхности благодаря лучшему проникновению корневой системы в почву и увеличению листовой поверхности, улучшая таким образом водное питание растений и фотосинтетическую активность целого.

Для облегчения этой задачи автор попытался классифицировать растительные сообщества отмеченные литературой и изучить различные климатические, почвенные и биологические факторы оказывающие на эти сообщества благоприятное, или неблагоприятное влияние.

Усилия его были поэтому направлены на изучение библиографии и интерпретацию при помощи некоторого количества биоклиматических концептов, результатов, часто противоречивых и отрывочных, указанных в литературе.

Изучение это, кроме того что оно заставило обратить внимание на другие, чем указанные в данной статье явления, в общем еще подтвердило начальные гипотезы и указало в какой мере совместные культуры могут привести к поставленной цели, — улучшению продуктивности влаги.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AHLGREEN H. L., AAMODT O. S., 1939. (Explication des effets réciproques entre les diverses variétés de plantes de prairie et de légumineuses par une interaction nuisible sur les racines.) (An) *J. Am. Soc of Agron.*, **31**, 982.

ALBERTA Th., SIBMA L., 1962. Dry matter production and light interception of crop surfaces II, Relation between rate of growth and length of grass. *Inst. Biol. Onderz. Landbouwgew. Meded.* 175-195., 47-58.

AMIZET L., 1958. La densité pratique des plantations commerciales d'arbres fruitiers. *Proc.* 15e *Congrès int. Hort. Nice*, **2**, 120-130.

ANTHONY K. R. M., WILLIMOT S. G., 1957. Cotton interplanting experiments in the South West Soudan. *Emp. J. Expt. Agric.*, **25** (97), 29-36.

ANTICHAN C., 1952. Les plantes de couverture dans la protection du sol en verger guinéen. *Fruits*, **7**, 339-341.

ASLYNG, 1958. Shelter and its effect on climate and water balance. *Oikos*, **9**, 282-310.

* BEINHART G., 1962. Effects of temperature and light intensity on corn uptake respiration and growth of white clover. *Plant. Physiol.*, **37**, 709-715.

* BELOVA T. P., 1958. Undercover cultivation of perennial grasses in the Leningrad region (R. an). *Vest Sel'skokhoz. Nauki.*, **5**, 146.

BLACK J. N., 1960. An assessment of the role of planting density on competition between red clover and lucerne in the early vegetation stages. *Oikos*, **11**, 26-42.

BLACKMAN G. E., WILSON G. L., Physiological and ecological studies in the analysis of plant environment.

VI. 1951. The constancy for different species of a log. relationships between net assimilation rate and light intensity and its ecological significance. *Ann. Bot.*, **15**, 63-94.

XII. 1959. The role of light factor in limiting growth. *Ann. Bot.*, **23**, 131-145.

BLAHA J., 1961. (Les engrais verts en viticulture) (Al. f). *Mitt. Klosterneuburg*, ser. A, **12**, 171-176.

* BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Ann. Agron.*, **13**, 93-110.

* BLONDEL L., 1954. L'entretien du sol et la non-culture dans les orangeraies. 3e *Cong. Intern. Agrum. Medit.*, **2**, 15-27.

BLONDEL L., 1959. La culture des agrumes en Algérie. *B. T. I.*, **142**, 469-488.

* BOLLARD E. C., 1957. Effect of a permanent grass cover on apple trees yields in the first years after grassing. *N. Zeal. J. Sc. Technol.*, A, **38**, 527-532.

* BOUCHET R. J., 1962. L'évapotranspiration potentielle. Sa mesure ou son estimation à partir de l'évaporation sous abri. Signification et intérêt écologique. Recherches sur la zone aride *Colloque de Montpellier* (sous presse). U.N.E.S.C.O

BOULAY H., 1953. Les cultures associées. *B. T. I.*, **79**, 333-341.

BREAZEALE E. L., Mc GEORGE W. T., 1953. Influence of atmospheric humidity on root growth. *Soil Sci*, **76**, 361-365.

BREAZEALE E. L., Mc GEORGE W. T., BREAZEALE J. F., 1951. Water absorption and transpiration by leaves. *Soil Sci*, **72**, 239-244.

BREVIGLIERI N., 1961. La nuova olivicoltura spezzializzata intensiva. *Ital. Agric.* **98**, 215-270.

BRIGGS L. J., SHANTZ H. L. The water requirements of plants. II. A review of the literature. *U. S. D. A. Bur. Plant Indust. Bull.*, 284.

* BRINGMANN K., KAISER H., 1955. (Bandes de maïs en tant que protection contre le vent) (Al). *Z. Acker Pflanzenb., IC*, **3**, 321-334.

* BULA R. J., 1954. Measurements of light beneath a small grain companion crop as related to legume establishment. *Bot. Gaz.*, **115**, 271-278.

CANHAM A. E., 1958. Soil temperature and plant growth. *Proc.* 15e *Intern. Hort. Cong.*, **2**, 440-451.

CANNON J. R. et *al.*, 1961. Antibiotics effects in plant communities. *Nature* (*G. B.*), **190**, 189-190.

CAPUTA J., INGOLD M., 1956. Mélanges standards pour la culture fourragère. *Rev. Rom. Agric.*, **12**, 24-28.

CHEVALIER A., 1924. Les mimosées arborescentes pour l'ombrage des cultures tropicales. *R. Bot. Appl.*, **4**, 677-678.

COENE R. de, 1956. Le bananier dans la rotation en zone cotonnière nord. *B. Inform. INEAC*, **5**, 113-126.

COUTANCEAU, 1956. Prix de revient comparé des diverses méthodes d'entretien du sol des vergers. *B. T. I.*, **113**, 555-556.

COWLING D. W., 1962. The production of winter grass from a row crop of cocksfoot and lucerne. *J. Brit. Grassl. Soc*, **17**, 161-166.

CRAENE de, CRAMER, 1932. Application et utilité des plantes de couverture et des engrais verts dans les plantations de caféiers du Kivu. *Rev. Agrol. Bot. Kivu*, 17-25.

CROCIONI A., 1946. Le piante oleifere nell'agricoltura italiana. *Ital. Agric.*, 83-7.

* CROCIONI A., 1951. (Observations sur l'association de la pomme de terre avec le tournesol et le maïs et sur les influences réciproques des plantes associées.) *Ann. Sper. Agraria*, **2**, 441-451.

DAVET P., 1961. Aspects phytopathologiques du choix d'une plante de couverture. *Rev. Mycol.*, **26**, 225-230.

DELMAS H. G., 1952. Quelques aspects de la culture de l'abricotier en France. *Fruits*, **7**, 6-7.

DOLGOV S. I., 1948. (Recherches sur les mouvements de l'eau du sol et son accessibilité pour les plantes) (R). *C. R. Ac. Sc. U. R. S. S.*

DOMMERGUES Y., 1962. Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. *Ann. Agron.*, **13**, 391-468.

* DONALD C. M., 1958. The interaction of competition for light and for nutrients. *Austral. J. Agric. Res.*, **94**, 421-435.

DROUINEAU G., 1948. Essais d'engrais verts en sols de vergers irrigués. *Rech. Fert.*, p. 49.

DROUINEAU G., 1951. Utilisation du lupin comme engrais vert dans les vignobles et les vergers en sols non calcaires. *Ann. agron.*, **2**, 596-598.

DAVISON, 1951. (La culture sous herbe dans les vergers irrigués du Marrumbridgee). (An) *Agric. Gaz. N. S. Wales*, **62**, 405-410.

* DURAND R., 1960. Mesure et signification de l'éclairement en physiologie végétale. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 109-118.

DUTTA S. K., SHARMA K. N., 1960. Manuring of green crops used in tea culture. *Emp. J. Expt. Agric.*, **28**, 53-58.

E. N. S. A. GRIGNON, 1962. Compte rendu du Centre de Recherche et d'Expérimentation. Mélange dactyle-luzerne et alimentation en eau ; équilibre dactyle-luzerne. Chaire d'Agriculture, p. 59-90.

ENTERMANN F. M. et *al.*, 1952. (Méthodes culturales pour l'établissement de cultures intercalaires graminées-mélilot. Effet de la variation du pourcentage des constituants sur le rendement). (An) *Agron. J.*, **44**, 514-516.

* EVANS A. C., 1960. Studies of intercropping. I. Maize or sorghum with groundnuts. *E. Afr. Agric. For. J.*, **26**, 1.

* EVANS A. C., SREED-HARAM A., 1962. Studies of intercropping II. Castorbean with groundnuts or soyabean. *E. Afr. Agric. J,*. **28**, 7-8.

* F. A. O., 1956. Le peuplier dans la production du bois et l'utilisation des terres. Culture du peuplier. II. Culture intensive.

FLORELL Girl, RUFLET H., 1960. Transpiration of plants of wheat cultivated under different environmental conditions. *Physiol. Plant.*, **13**, 482-486.

FRITH H. J., 1952. (Quelques effets de la suspension des travaux culturaux sur le rendement et la croissance des agrumes). (An) *Austral. J. Agric. Res.*, **3**, 259-276.

FUNK C. R. Jr, 1962. Influence of hybrid, plant type, seed quality, row direction, plant population and planting date on competition effects in field corn (*Zea Mays* L.) including a study of hybrid mixture. *Diss. Abs*, **23**, 16.

GAASTRA P., 1959. Photosynthesis of plants as influenced by light, CO_2, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhog. Wageningen*, **59**, 12, 1-68.

* GACHON L., COLLIER D., ROBELIN M., 1961. Influence de différentes conditions pédo-climatiques sur le comportement de l'association luzerne-dactyle en Limagne argilo-calcaire. *C. R. Ac. Agric.*, **47**, 298-306.

* GESLIN H., 1952. Contribution à l'étude du complexe heliothermique *Ann. agron.* **3**, 321-326.

* GESLIN H., 1944. Étude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat (température et radiation solaire). Contribution à l'étude du climat du blé. Thèse. 116 p. I. N. R. A. Paris.

GODARD M., 1944. Densité de peuplement et radiation solaire dans la culture de la betterave sucrière. *C. R. Ac. Agric.*, **30**, 155-159.

GODARD M., 1949. Microclimats et mésoclimats du point de vue agronomique. *Ann. agron.*, **19**, 578-604.

GRAY B. et *al.*, 1953. Potassium competition in grass-legume association as a function of root-cation exchange capacity. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, **17**, 235-239.

GREGORY F. G., MILTHORPE F. L., PEARSE H. L., SPENCER H. J., 1950. Experimental studies of the factors controlling transpiration. II. Relation between transpiration rate and leaf water content. *J. Exp. Bot.*, **1**, 15-28.

GUILLAUMIN A., 1943. Arbres d'ombrage, plantes de couverture et tuteurs vivants en Nouvelle Calédonie. *R. Bot. Appl.*, **23**, 26-32.

GUIRENKO A., LIVENSKY A., 1962. (Mixed cultivation of corn and soybean in the Ukrainian (R. an). *Vest. Selskokh. Nauki*, **8**, 25-30.

GULIAIEV E. I., RONSAL G. A., 1962. (On the effect of the root excretion of annual cultivates legumes on the vital activity of the maize in mixed cultures) (R). *Bot. J.*, **47**, 1152-1159.

GUTKNECHT J., 1961. Quelques aspects de la production du coton en Ouganda. *Cot. Fib. Trop.*, **16**, 369.

HAGAN R. M., VAADIA Y., RUSSEL M. B., 1959. Interpretation of plant responses to soil moisture regimes in water and its relation to soils and crops. *Adv. Agron.*, **11**, 77-98.

* HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. Thèse, 106 p. I. N. R. A. Paris.

* HANDBUCH DER PFLANZENPHYSIOLOGIE, 1956. Tome IV.

* HARVEY C., 1951. (Interactions dans les cultures légumineuses-graminées (An). *Iowa St. Coll. J. Sci.*, **25**, 242-243.

* HENIN S., 1960. *Le profil cultural.* Société d'édition des Ing. Agricoles.

* HUGUES P., 1962. Essais de fourrages dérobés en culture irriguée dans le midi de la France. *B. T. I.*, **171**, 557-568.

HYRE R. A., 1955. Effect of lima beans cover on temperature and relative humidity. *Plant Disease Rep.*, **39**, 473-474.

* ITO K., MATSUOKA K., KAWAKAMI M., 1957. Studies on the cropping system on hill side farms from the stand point of erosion control II. On the effects of erosion control of summer intercropping or winter intercropping of green manure (J. an). *B. Shikoku Agric. Sta*, **3**, 21-46.

* ITO K. et *al.*, 1960. On the water economy in sloping cultivated fields when grass is grown for soil conservation between the rows. (J. an). *B. Shikoku Agric. Expt. Sta*, **4**, 131-140.

JOUIS, 1952. Enquête sur les effets d'une fumure régulière des vergers pâturés. *Ann. agron.*, **3**, 679-685.

* KANTER A., CAPUTA J., 1952. (Expériences comparatives sur la productivité de la luzerne en semis pur, de la luzerne en mélange avec du trèfle rouge et des graminées) (Al. f). *Annu. agric. suisse*, **66**, 1-16.

* KUTSCHERA L., 1960. Würtzelatlas Mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. Frankfurt a/Main *D.L.G. Verl.*

KURZTEN, 1952. (L'importance de l'azote et de l'eau pour réduire la compétition entre le maïs et les cultures intercalaires.) (An) *Agron. J.*, **44**, 13-17.

LANGILE J. E., WARREN F. S., 1962. Influence of clipping treatment on the yield mineral content and root development of three grass-alfalfa mixtures. *Canad. J. Plant Sci.*, **42**, 611-615.

LARUE M., 1960. Le pistachier en Iran. *Fruits*, **15**, 139.

LARUE P., 1954. Rapport sur une expérience de non-culture. 3e *Congr. Intern. Agrum. medit.*, **2**, 29-40.

LEE R., 1962. Relationships between potential insolation and the orientation of watersheds with respect to evapotranspiration. *Diss. Abs.*, **23**, 776-777.

* LEMEE. G., 1963. Cours d'Écologie professé à la Faculté des Sciences de Paris-Orsay.

LETEY J., BLANCK G. R., 1961. Influence of environment on the vegetative growth of plants watered at various soil moisture suctions. *Agron. J.*, **53**, 151-152.

MADSON B. A., 1951. Winter cover corps. *Calif. Agric. Expt. Sta* C 174, 23 p.

MAINE M., 1958. Problèmes agricoles et sociaux de Normandie. Herbages et pommiers à cidre, bouilleurs de cru et pommiers à couteau. *Agricult.* (F), **21**, 205, 255-260.

MAKKINK G. F., Van HEEMST H. D. J., 1962. Root growth and water consumption in cereals (Ne. an). *Inst. Biol. Onderz. Landbouwgew. Med.*, 175-195, 113-120.

MALYGIN J. N., 1959. (Le lupin vivace dans l'arboriculture fruitière de la zone non tcheznozem) (R). *Udobr. i Urozhaj*, **4**, 49-51.

MAUME L., DULAC J., 1946. Influence préjudiciable d'une culture associée (vesce-avoine) sur la croissance et le mode de nutrition des arbres fruitiers. *C. R. Ac. Agric.*, **32**, 153-156.

MICHAEL G., DORINE H., 1950. (Sur la possibilité d'une alimentation de l'avoine en azote par l'intermédiaire des légumineuses en mélanges (Al). *Z. Pflanzennach*, **53**, 143-164.

* MICHELET R., 1962. Le ray-grass d'Italie dans les vergers. *Bull. Engrais*, 450, 113-116.

MITCHELL K. J., SOPER K., 1958. Effects of differences in light intensity and temperatures on the anatomy and developement of leaves of *Lolium perenne* and *Paspalum dilatatum*. *N. Zeal. J. Agr. Res.*, **1**, 1-16.

NAGIEV T. K., 1961. (Influence des cultures intercalaires sur la fertilité du sol et le rendement du cotonnier) (R). *Khlopkovodstvo*, **11**, 28-31.

* NICHIPOROVICH A. A., 1962. Properties of plant crops as an optical system *Fiziol. Rasten.* (Translated), **8**, 428-435.

* NICHIPOROVICH A. A., 1962. Sun, Photosynthesis, Crop. *Priroda*, **51**, 6, 19-28.

* NISHIMURA S. et *al.*, 1955. Plant competition and cooperation observed in the mixtures. *B. Shikoku*, **2**, 41-57.

PASAK V., 1962. (L'humidité de l'air à l'intérieur des peuplements forestiers) (Tch. f).) *Lesnictvi*, **8**, 719-734.

PATT J., 1956. Experiments of non tilling of citrus in the coastal zone of Israel. *4e Congr. Intern. Agrum. Medit.*, 219-231.

PEAT E. J., BROWN K. J., 1960. Effect of management on increasing crop yield in the Lake province of Tanganyika. *E. Af. Agric. Forest. J.*, **26**, 103-105.

PEREIRA H. C., HOSEGOOD P. H., 1962. Soil moisture effects of Kudzu as a clove orchard cover-crops. *E. Afr. Agric. Forest. J.*, **27**, 225-229.

POURTET J., 1961. Les méthodes modernes de culture du peuplier. *B. T. I.*, **156**, 73-81.

PROEBSTING E. L., 1952. Some effects of long continued covercropping in a Californian orchard. *Proc Am. Soc. Hort. Sci.*, **60**, 87-90.

PSEBELSKIY N. V., 1952. (Productivité des cultures fourragères en mélange, en rapport avec la modification de leur composition) (R). *Soviet Agron.*, **10**, 57-62.

RAVEL D'ESCLAPON de, 1958. Un voyage documentaire d'arboriculture en Italie du Nord. *B. T. I.*, **133**, 503.

REBISCHUNG J., 1962. Études sur la croissance et le développement du dactyle. *Ann. Amélior. Plantes*, **12**, 175-196.

REBOUR H., 1951. L'engrais vert permanent dans les vergers irrigués. *Rev. Hort.*, **123**, 131-194.

REGNIER R., 1959. La culture intensive du peuplier d'après les expériences italiennes. *C. R. Ac. Agric.*, **45**, 762-769.

REGNIER R., HEDIN L., 1955. Le problème de la production fruitière dans les herbages. *B. T. I.*, **104**, 663-670.

REINKEN G., 1958. Über die Transpiration von Apfelbäumen. *Proc.* 15. *Congr. Intern. Hort.*, **11**, 173-181.

* REYNTENS H., de BAERDEMAEKER A., 1959. Le gazon de trèfle blanc (*Trifolium repens*) et de pâturin commun (*Poa trivialis*), une couverture idéale du sol pour les cultures fruitières à basse tige. *Rev. Agric.* (Belge), **12**, 595-600.

* ROBELIN M., 1962. Évapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. *Ann. Agron.*, **13**, 493-522.

ROMANOVSKY, TOPUSHEVA, 1959. (Essai de semis du Shabdar comme engrais vert dans la culture du cotonnier) (R). *Khlopkodstvo*, **93**, 24-27.

ROUX J. B., 1953. Quelques années d'expérimentation cotonnière dans le Sud tchadien. *Coton et Fib. trop.*, **8**, 231-239.

* SAKAMOTO H. et *al.*, 1957. Studies on the cultivation of cover crops for orchards. *B. Shikoku Agric. Sta*, **3**, 21-46.

* SAKAMOTO H. et *al.*, 1960. Studies on the cultivation and management of cover crops for orchards. *B. Shikoku Agric. Expt. Sta.*, **5**, 161-176.

* SAKAMOTO et *al.*, 1960. Study on the soil of sloping citrus orchard with perennial cover crops. *B. Shikoku Agric. Expt. Sta.*, **5**, 177-189.

SCARAMUZZI F., 1962. (Situation actuelle et perspectives de la culture de l'abricotier en Italie). *Frutticoltura*, **24**, 17-36.

SCHWENDIWAN et *al.*, 1953. The production of tops and roots of grass and sweetclover when grown in mixture. *Agron., J.* **14**, 110-114.

SHAH K. H., PATEL R. M., 1959. Desirability or otherwise of interculturing in row crop. *Ind. J. Agric. Sci.*, **29**, 1-19.

* SLATYER R. O., MCILROY I. C., 1961., *Practical microclimatology*. Unesco

SPRAGUE V. G., GARBER R. J., 1950. (Influence de l'époque, de la hauteur de coupe et de la fertilisation azotée sur la persistance des légumineuses et la productivité des associations *Dactylis glomerata-Trifolium repens* et *Bromus inermis-Trifolium repens*). (An). *Agron., J.* **42**, 586-593.

STEPHENS J. C., 1961. Evapotranspiration studies in Florida. *Soil. Sc. Soc. Flor. Proc.*, **21**, 81.

STERN W. R., DONALD C. M., 1962. Light relationships in grass-clover swards. *Austral. J. Agric. Res.*, **13**, 599-614.

STERN W. R., DONALD C. M., 1962. The influence of leaf area and radiation on the growth of clover in swards. *Aust. J. Agric. Res.*, **13**, 615-623.

STOECKELER J. H., 1958. Preliminary observations of perennial lupine as a cover crop in field planting sites and forest nurseries in Wisconsin. *Soil. Sc. Soc. Am. Proc.*, **22**, 170-173.

STUDER R., 1961. Méthode de détermination des réserves hydriques des sols. *Ann. agron.*, **12**, 599-608.

* SUTA A., 1958. Meilleure utilisation des engrais dans les vergers de pommiers cultivés sur prés. *Proc.* 15e *Intern. Hort. Congr.*, **2**, 114-119.

* SVINARJOV V. I., 1957. On the problem of interrelationships of plants in artificial mixtures of varieties (R an). *Bot., J.* **42**, 41-56.

* SYED RIAS HUSSAIN SHAH. 1962. Studies on wind protection. *Inst. Biol. Field. Res.*

TAKECHI O., KIKUCHI J., 1954. Study on the micrometeorology in the citrus orchards, different only in tree density. *J. Agric. Meteo Tokyo*, **9**, 115-118.

TAZNOKHIN F. L., 1953. (Sur les semis mixtes de luzerne et millet) (R). *Dok. Akad. Lenin.*, **2**, 8-10.

TEMPLETON W. C., MOTT G. O., BULA R. J., 1961. Some effects of temperature and light on growth and flowering of tall fescue. *Crop. Sci.*, **1**, 216-219.

THIEBAUT M., 1951. L'humus au verger par les engrais verts et le mulching. *C. R. Essais Meurthe-et-Moselle.*

TOFANI M., 1960. Agricoltura collinare. *Ital. Agric.*, **97**, 111-127.

VINCZEFFY et *al.*, 1954. Report on the results of the grass association trials made in Budapest (Ho. an). *Agrartud. Egyetem Agron. Kidvan.*, **1**, 10-3-20.

VOISIN A., 1953. Grandeurs et faiblesses du Ley farming. *B. T. I.*, **82**, 673-704.

VRIES D. A. de, 1959. The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground. *J. Met.*, **16**, 256-270.

WEST E. S., HOWARD A., 1938. Quelques effets de l'engrais vert sur les agrumes et sur le sol. (in *Ann. agron.*, **3**, 1939).

WILLIAMS E. J., 1962. The analysis of competition experiments. *Austral. J. Biol. Sci.*, **15**, 509-525.

WOLF D. D., 1962. Yield, persistance and water utilization of several legume-grass mixtures as affected by cutting frequencies and nitrogen fertilization. *Dis. Abs.*, **23**, 1153.

* YEVGHEK NARAYAN AYIER, 1949. Cultures en mélange aux Indes. *Ind. J. Agric. Sci.*, **19**, 439-543.

YOUNG N. D., BURNS M. A., 1959. A study of three important pasture mixtures in the Queensland subtropics. *Queensl. J. Agric. Sci.*, **16**, 199-215.

ZUCCHINI M., 1959. Le conquiste della frutticolture laziale. *Ital. Agric.*, **96**, 1053-1066.

ADDENDUM

Références se rapportant aux Annales agronomiques, Nos 4 et 5, 1963

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, Évapotranspiration potentielle et production agricole *Ann. agron.*, **14** (5).

DAMAGNEZ J., 1963. Problèmes d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Ann. agron.*, **14** (4)., 553-568.

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. Modification des microclimats et amélioration de la production agricole. *Ann. Agron.*, **14** (4), 429-498.

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de déssèchement. *Ann. agron.*, **14** (4), 393-428.

PARCEVAUX S. de, 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche, essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. *Ann. agron.*, **14** (5).

Ann. agron., 1963, **14** (4), 535-542.

ESSAI D'INTERPRÉTATION DES MESURES DE PRESSION DE SUCCION DES FEUILLES

SUZANNE MÉRIAUX
avec la collaboration technique de C. PERREY

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon (Côte-d'Or)

SOMMAIRE

La pression de succion des feuilles est liée au potentiel de l'eau dans le sol et à l'évapotranspiration. Des mesures de pression de succion des feuilles de Dactyle, effectuées au cours de trois années, illustrent cette relation en insistant sur l'importance de l'évapotranspiration. Dans les conditions locales de croissance du Dactyle, les stomates sont presque toujours fermés, et l'irrigation ne conduit qu'à augmenter faiblement la durée de leur ouverture. Ces résultats montrent l'insuffisance d'action de l'irrigation et laissent supposer l'effet important que pourraient occasionner, sur les rendements, les méthodes assurant la réduction de l'évapotranspiration potentielle.

INTRODUCTION

Afin de préciser le besoin en eau des plantes dans différentes conditions d'alimentation hydrique, des mesures de pression de succion des feuilles de dactyle ont été faites lors d'un essai d'irrigation au Domaine expérimental d'Époisses (Côte-d'Or) sur un sol de 100 mm environ de réserve hydrique. Les déterminations ont été poursuivies parallèlement sur les plantes des parcelles témoins ne recevant que les précipitations locales P et sur celles des parcelles irriguées hebdomadairement par des doses I = ETP-P (ETP étant déduit de la formule de BOUCHET (1960)).

Le climat des trois années d'étude a été extrêmement varié.

L'année 1960 était caractérisée par un printemps sec avec des précipitations orageuses très importantes et par une période pluvieuse à partir du 7 juillet. Le déficit théorique en eau du sol (somme de l'évapotranspiration potentielle moins les pluies) a atteint la valeur maximum de 210 mm au cours de la troisième décade de juin.

En 1961, le printemps normalement humide était suivi d'une première période de sécheresse en juin, d'une période pluvieuse jusqu'au 10 août et d'une deuxième et longue période de sécheresse jusqu'à la mi-octobre, date à laquelle le déficit théorique s'élevait à 310 mm.

La campagne 1962 a débuté par un printemps très humide jusqu'au 1er juin ; elle s'est poursuivie par une longue période de sécheresse interrompue par des précipitations de 50 mm en septembre. Le déficit théorique, nul au 1er juin, s'est accru rapidement pour atteindre 370 mm fin octobre.

Les mesures de pression de succion ou déficit de pression de diffusion (DPD) ont été réalisées par la méthode densimétrique dite « des Jets » de CHARDAKOV qui donne une précision de deux atmosphères environ.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

M. HALLAIRE (1962), pour expliquer des résultats anormaux concernant la circulation de l'eau à contre-gradient d'humidité, a été conduit à préciser la notion de potentiel efficace ψ_e. Il considère, dans le sol, le courant macroscopique qui assure le transport de l'eau jusqu'à la surface évaporante par des itinéraires préférentiels (I) et, à l'intérieur de chaque maille délimitée par ces itinéraires, des courants microscopiques (i) qui alimentent le courant général en provoquant le desséchement des mailles.

Le potentiel de l'eau en (I) ou potentiel efficace est fonction du potentiel de l'eau au cœur de la maille ψ (H) et de la vitesse de desséchement $\frac{dH}{dt}$.

$$(1)\ \psi\, e = \psi\,(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt}$$

où K = constante;
L = longueur moyenne des itinéraires (i);
λ = coefficient de conductibilité du sol pour l'eau.

Entre le sol et la feuille, l'eau subit plusieurs chutes de potentiel : du cœur de la maille à la périphérie, au passage dans la racine et au passage dans les vaisseaux conducteurs.

Le potentiel de l'eau dans les feuilles ψ_f peut donc s'exprimer en fonction du potentiel de l'eau au cœur du sol et des différentes chutes de potentiel :

$$(2)\ \psi_f = VPo + \psi\,(H) + \frac{KL}{\lambda}\frac{dH}{dt} + \Delta\,(\psi)\,r + \Delta\,(\psi)\,v$$

où P_o = pression osmotique de la solution du sol.
et V = volume spécifique de l'eau (= 1 $cm^3 \cdot g^{-1}$).

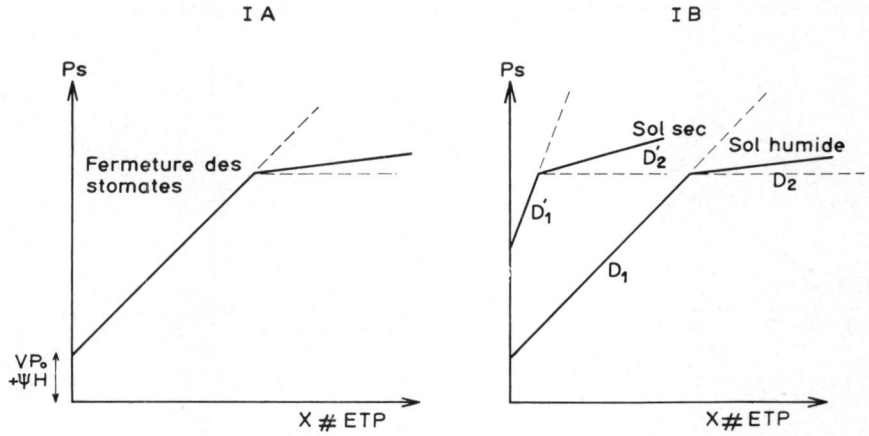
Dans cette équation $\frac{dH}{dt}$, $\Delta(\psi)r$ et $\Delta(\psi)v$ sont proportionnels à l'évaporation.

En définitive, la pression de succion des feuilles P_s numériquement égale à $\psi(f)$ si P est évalué en g/cm² et ψ en g. cm se traduit par l'équation suivante :

$$(3)\ VP_s = VPo + \psi\,(H) + \left(\frac{K_1}{\lambda} + K_2\right) E$$

où E = évapotranspiration réelle;
K_1 = constante liée au sol;
K_2 = constante liée à la plante.

La formule (3) montre comment P_s est lié au potentiel total de l'eau dans le sol $VP_o + \psi(H)$ et à l'évapotranspiration E. Si, ne connaissant pas les valeurs de l'évapotranspiration réelle, on représente la variation de P_s en fonction d'une variable X égale ou proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle, on devrait obtenir une droite répondant à l'équation (3) pour les faibles valeurs de X, car dans ces conditions l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle (graphique 1 A). L'ordonnée à l'origine traduit le potentiel de l'eau dans le sol.



Quand P_s augmente, les stomates se ferment : E est alors différente de ETP. Seule la transpiration cuticulaire subsiste. Le deuxième segment de droite qui traduit la variation de P_s en fonction de ETP aurait donc un coefficient angulaire 10 fois plus faible que le premier segment, si la transpiration cuticulaire (E cut.) est approximativement égale au 1/10 de l'évapotranspiration potentielle (voir droites D_1 et D_2 fig. 1 B). L'intersection de D_1 et D_2 aurait pour ordonnées la valeur particulière de Ps correspondant à la fermeture des stomates.

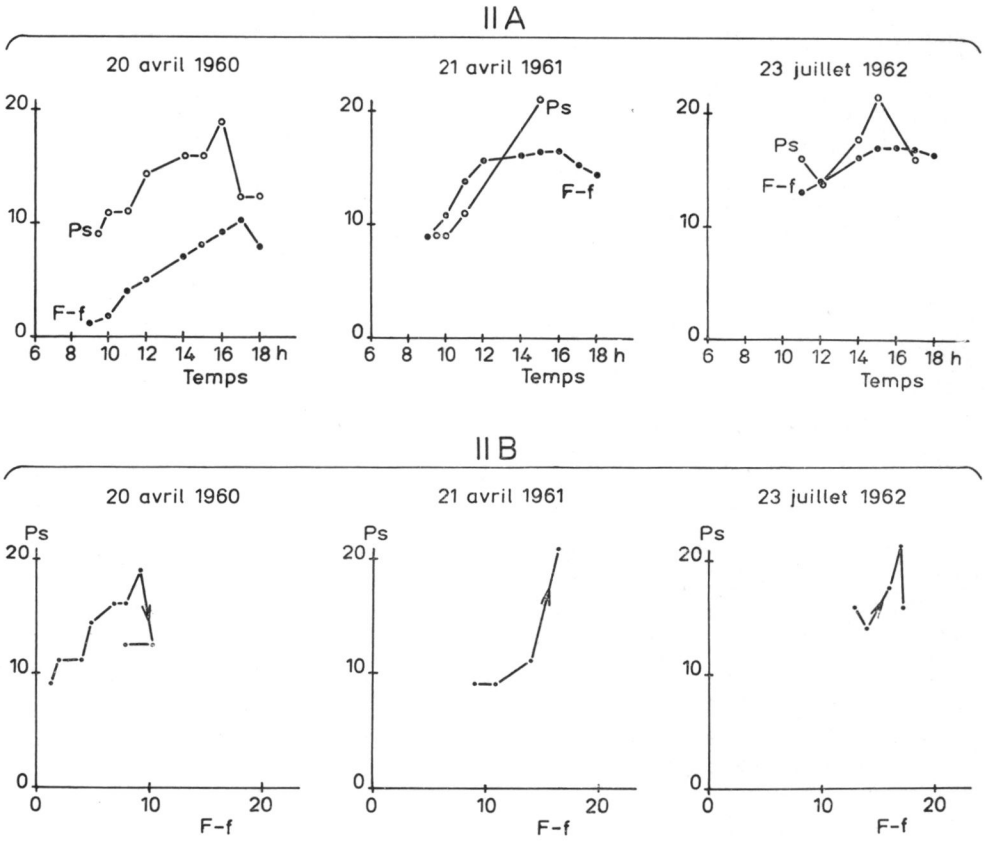
Si l'on considère maintenant l'humidité du sol, sa modification entraînera une variation de l'ordonnée à l'origine (graphique 1 B). Plus l'humidité du sol est faible, plus le potentiel de l'eau est élevé, plus grande est l'ordonnée à l'origine, et vice-versa. De plus, à mesure que H diminue, le coefficient de conductibilité λ décroît rapidement. Il résulte alors de la formule (3) que le coefficient angulaire de la droite (P_s-E) ou (P_s-X) doit augmenter ; c'est ainsi que d'un sol humide à un sol sec, on doit s'attendre à ce que la relation (P_s-X) soit respectivement représentée par des droites telles que D_1-D_2 et D_1'-D_2' (fig. 1 B).

C'est à partir de ces hypothèses de travail que nous allons expliquer les résultats de nos mesures de pression de succion. N'ayant pas eu la possibilité d'estimer l'évapotranspiration réelle, nous relierons les valeurs obtenues à l'évapotranspiration potentielle ou à une variable qui lui est proportionnelle.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1°) Vérification générale de la relation P_s-ETP

L'évapotranspiration potentielle instantanée n'étant pas connue, elle a été remplacée soit par le déficit de tension de vapeur d'eau de l'atmosphère (F-*f*), soit par la quantité d'alcool [1] évaporé dans l'évaporomètre Piche (E alcool mm/h), soit enfin, quand il s'agissait de mesures effectuées à la même heure de la journée, par l'évapotranspiration potentielle journalière.

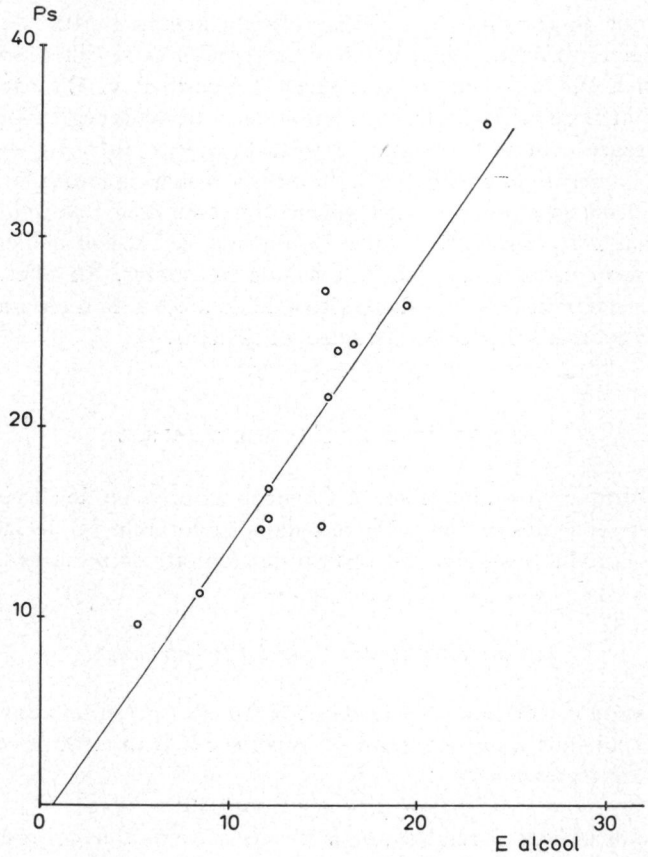


a) *Variation journalière de la pression de succion*

Nous considérerons la variation de P_s au cours d'une journée dans des parcelles témoins présentant une humidité du sol faible et constante. Le graphique II A montre, ainsi que le raisonnement le laissait prévoir, un parallélisme certain entre cette variation et celle de F-*f*.

[1] L'alcool a été utilisé à la place de l'eau, car sa grande volatilité permet de réaliser des mesures sur des laps de temps assez courts. Cette mesure traduit l'action du vent qui est une composante de ETP, mais n'est pas en relation avec le déficit de saturation.

Si l'on représente (graphique II B) l'évolution de P_s en fonction de F-*f*, elle se traduit par trois segments de droite dont les coefficients angulaires sont respectivement positif, négatif et sensiblement nul. L'ensemble de la représentation graphique indique un phénomène d'hystérésis dont la formule (3) ne tient pas compte et qui traduit l'influence des conditions météorologiques passées sur la mesure instantanée de la pression de succion. Une valeur de P_s mesurée au champ à un instant donné est la résultante des données climatiques préalables. On ne s'étonnera donc pas d'avoir entre P_s et ETP non les relations rigoureuses que laissait prévoir la formule (3) mais de simples corrélations.



On n'observe pas sur ce schéma la rupture de pente prévue sur le graphique I A pour la valeur de P_s à partir de laquelle les stomates se ferment. Il est probable que, lors des premières mesures à 9 h 30 dans les parcelles témoins, les stomates étaient déjà fermés et que le 1er segment de droite du graphique II B correspond à la 2e partie de la courbe du graphique I A. Dans ce cas, il faudrait en conclure que les stomates se ferment aux environs de 8 à 9 atmosphères.

b) *Variation de la pression de succion au cours du temps*

La pression de succion a été mesurée à heure fixe au cours de plusieurs années d'étude. Pour serrer de plus près l'évapotranspiration potentielle instantanée, l'évaporation de l'alcool a été prise en considération. 12 mesures ont été faites dans des conditions de déficit du sol supérieures à 55 mm. Les résultats montrent une corrélation très étroite entre les deux variables ($r = 0{,}93$). La droite de régression s'exprime ainsi :

$$P_s = -1{,}12 + 1{,}51\ E_{\text{alcool}}.$$

Cette droite de régression figurée sur le graphique III n'est pas conforme au modèle théorique du graphique I A. On n'y observe aucune rupture de pente et l'ordonnée à l'origine est même négative. Pour interpréter cette différence, il faut considérer que, bien que la corrélation soit excellente entre P_s et E alcool, elle n'a été calculée qu'à partir de 12 résultats. L'équation de la droite de régression ne doit donc pas être envisagée comme traduisant la relation précise entre les deux variables. D'autre part, la mesure la plus faible de P_s est 9,6 et nous ignorons la relation réelle entre P_s et E alcool en dessous de cette valeur. Il ne faut donc retenir de ces résultats que l'indication d'une corrélation entre la pression de succion et l'évaporation de l'alcool dans des conditions de déficit hydrique suffisantes. En effet, on constate l'absence de corrélation entre les deux séries de données si l'on envisage l'ensemble des mesures effectuées sur parcelles irriguées et témoins.

2°) Influence de l'humidité du sol

L'état hydrique du sol influe sur la valeur de la pression de succion des feuilles ainsi que la présence des termes $\psi(H)$ et λ dans la formule (3) le laisse supposer.

Quelques corrélations obtenues à partir de résultats de mesures illustrent cette influence.

a) *Corrélation entre P_s et ETP journalière*

Une première corrélation est calculée à partir de 15 résultats dans les parcelles témoins correspondant à un déficit du sol supérieur à 55 mm. Dans ce cas $r = 0{,}75$ et l'équation de régression est :

$$P_s = 7{,}60 + 2{,}90\ \text{ETP}.$$

Pour une deuxième corrélation, on a tenu compte de tous les résultats des parcelles témoins, quel que soit le déficit du sol ($N = 23$). Le coefficient de corrélation est égal à 0,68 et l'équation de régression est la suivante :

$$P_s = 9{,}06 + 2{,}3\ \text{ETP}.$$

La comparaison des coefficients de régression et de corrélation de ces deux droites ne permet pas de les différencier. Il semble donc que la liaison entre P_s et ETP soit plus forte quand le déficit du sol est plus élevé, comme le laissait supposer le raisonnement exposé plus haut (fig. 1 B) mais aucune affirmation n'est possible.

Par contre, l'absence de corrélation constatée entre P_s et ETP sur les parcelles irriguées met en évidence l'action de l'état hydrique du sol.

b) *Corrélation* P_s-(F-f)

Comme dans le cas précédent, la corrélation a été calculée à partir de résultats correspondant à un déficit hydrique supérieur à 55 mm. Le coefficient de corrélation est égal à 0,63 et la régression s'exprime par l'équation :

$$P_s = 8{,}93 + 0{,}86\ (F\text{-}f)$$

relation qui répond encore à ce que la théorie laissait prévoir.

Là encore si l'on envisage l'ensemble des mesures, quel que soit le déficit du sol, aucune corrélation n'apparaît, ce qui peut être dû au fait qu'en sol humide (et quand P_s est assez élevé) la pression de succion P_s ne varie que peu avec l'évapotranspiration potentielle instantanée (voir droite D_2 fig. I B).

c) *Analyse statistique d'ensemble des mesures de* P_s

Pour chacune des trois années d'étude, l'analyse d'ensemble des résultats met en évidence une différence significative entre la pression de succion des feuilles dans les parcelles témoins et irriguées. Cette différence n'apparaît pas toujours lors des mesures individuelles car, par temps couvert, le faible pouvoir évaporant de l'air peut la masquer.

CONCLUSION

Il découle de ces observations que la relation entre la pression de succion des feuilles et le pouvoir évaporant de l'air est très nette et que ce dernier facteur a une action plus importante que les conditions hydriques du sol.

Il se dégage nettement de toutes les courbes construites ou calculées à partir des mesures une valeur de l'ordonnée à l'origine voisine de 8 à 9 atmosphères. Il faudrait en conclure d'une part que cette valeur représente à peu près la pression de succion correspondant à la fermeture des stomates, d'autre part que dans les conditions locales de croissance du dactyle, les stomates sont presque toujours fermés. Ainsi, l'action positive de l'irrigation sur le rendement n'est due qu'à une ouverture un peu plus longue des stomates et par-là, à une durée légèrement plus grande de la photosynthèse. L'irrigation ne serait donc qu'un palliatif aux conditions de sécheresse et se montrerait très insuffisante pour placer le végétal dans les conditions de croissance optimales. Il ressort au contraire de ces résultats que tous les procédés permettant de diminuer ETP (brise-vent par exemple) auront sur la production végétale une action importante.

Reçu pour publication en mars 1963.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos vifs remerciements à M. Hallaire qui nous a orienté dans ce travail par ses études théoriques et qui nous a sans cesse prodigué ses conseils.

SUMMARY

AN EXPERIMENT ON INTERPRETING THE MEASUREMENTS OF SUCTION PRESSURE OF LEAVES

During three years of variable climatic conditions, but always including a period of drought, measurements of the suction pressure of leaves of *Dactylis* showed a correlation between the suction pressure on the one hand and the moisture potential of the soil and evapotranspiration on the other. Under the local conditions of *Dactylis* growth, the stomata are nearly always closed, and the effect of irrigation is only due to a slightly longer opening of the stomata. The results indicate that the effects of irrigation are insufficient, and suggest that methods of decreasing potential evapotranspiration may have marked effects on yields.

ZUSAMMENFASSUNG

DEUTUNGSVERSUCH DES AN BLÄTTERN GEMESSENEN SAUGDRUCKS

Während drei Jahren mit veränderlichen Klimabedingungen, die aber heveils eine Trockenperiode betrugen, zeigten Saugdruckmessungen der Blätter des Knaulgrases die Beziehung zwischen Saugdruck einerseits und Wasserpotential im Boden und Evapotranspiration andrerseits. Unter den lokalen Bedingungen des Knaulgraswachstums sind die Spaltöffnungen fast immer geschlossen und die Wirkung der Bewässerung beruht nur auf einer etwas längeren Öffnung derselben. Diese Ergebnisse zeigen die mangelhafte Wirkung der Bewässerung und lassen erahnen, welch wichtigen Effekt die Methoden zur Verringerung der potentialen Evapotranspiration auf die Erträge haben könnten.

РЕЗЮМЕ

Опыт интерпретации измерения давления всасывающей способности листьев.

СУСАННА МЭРИО (Дижон).

В течении трех лет, в различных климатических условиях, но всегда с одним периодом засухи, измерения давления всасывающей способности листьев ежи иллюстрировали соотношение между силой всасывания с одной стороны, и потенциалом влаги в почве и эвапотранспирацией — с другой. В местных условиях произростания ежи устьица почти постоянно закрыты и, только благодаря их немного более длительному открытию, ирригационная влага производит свое действие. Указывая на недостаточное действие ирригации эти результаты заставляют предполагать, что методы уменьшения потенциальной эвапотранспирации, могли-бы оказать большиий эффект на урожайность.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1960. Évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal : sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1231-1233.

BOUCHET R. J., de PARCEVAUX S., 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'évapotranspiration potentielle au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric. France*, nº 13, 686-694.

HALLAIRE M., 1962. La potentiel efficace de l'eau en régime de desséchement. *C. R. Acad. Sci.* **254**, 2047-2049.

MÉRIAUX S., PERREY C., 1961. Observations sur l'irrigation du dactyle en sol de réserve hydrique moyenne. *Ann. agron.*, **12**, 81-86.

de PARCEVAUX S., 1961. Tests physiologiques permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes. *Ann. agron.*, **12**, 75-80.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 543-558.

PROBLÈMES D'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE EN TUNISIE (1)

J. DAMAGNEZ, Ch. RIOU, O. DE VILLÈLE, et S. EL AMAMI.

Section de Bioclimatologie,
Institut national de la Recherche agronomique de Tunisie, Ariana.

SOMMAIRE

L'étude de l'évapotranspiration potentielle en Tunisie conduit à analyser les parts respectives des apports radiatif et convectif.

A l'échelle de la Tunisie, l'évapotranspiration potentielle est en très bonne relation avec le rayonnement global absorbé.

I. — INTRODUCTION

Du fait de l'extension de l'irrigation en Tunisie, la connaissance de l'évapotranspiration potentielle de ses différentes régions est indispensable pour calculer les besoins en eau des cultures et prévoir l'importance des ouvrages hydrauliques de répartition de l'eau.

Or, les différentes formules climatiques utilisées à cet effet (THORNTHWAITE, PENMAN, BLANEY et CRIDDLE...) font apparaître de grandes divergences dans les résultats (DAMAGNEZ, 1960). Par exemple, la formule de THORNTHWAITE donne à Tunis une ETP annuelle de 936 mm, alors que celle de PENMAN conduit à une valeur de 1 337 mm, pour une ETP mesurée voisine de 1 400 mm. Il était donc nécessaire d'effectuer des mesures directes dans les différentes zones de Tunisie. C'est pourquoi l'installation des postes s'est répartie à différentes latitudes, du Nord méditerranéen, au Sud saharien, et s'est effectuée avec le plus grand soin quant à l'homogénéité du

(1) Article paru dans les Annales de l'Institut national de la Recherche agronomique de Tunisie, vol. 35, 1963.

matériel et la similitude des conditions expérimentales : anneau de garde identique pour tous les évapotranspiromètres, et répétitions quand c'était possible (3 postes de mesures à Tunis).

Mais en raison de l'importance des effets d'oasis, qui consistent en des apports advectifs d'énergie pour des périmètres irrigués de petites dimensions ou des bacs d'évaporation placés au sein d'une zone sèche, et qui sont d'autant plus prononcés que l'aridité de la région considérée est plus grande, une lourde hypothèque pouvait subsister sur la validité de nos mesures : au lieu de donner une signification climatique à l'échelle régionale, ne représentaient-elles pas plutôt une série de situations microclimatiques particulières ? Selon LEMON (1962) par exemple, l'ETP estimée à partir du bilan de rayonnement peut doubler ; BOUCHET et de PARCEVAUX (1962) attribuent également à des effets d'oasis, les différences considérables entre l'ETP mesurée dans une station relativement abritée (parc de Versailles) et celle mesurée dans une situation de plateau très ventée (La Minière).

C'est pourquoi, parallèlement aux mesures de référence, des déterminations de consommation d'eau ont été répétées sur des cultures de taille et de densité aussi diverses qu'un gazon court au couvert continu et qu'une culture arbustive élevée (oliviers) abondamment irriguée. Nous avons ensuite comparé les mesures obtenues à celles d'une série ancienne, mais relativement longue, d'évaporation en bac flottant sur le lac de Tunis.

Pour préciser les résultats, des mesures d'ordre microclimatique nous permettront d'évaluer, dans le cas de surfaces irriguées de petites dimensions (oasis), l'épaisseur des couches perturbées : suivant l'échelle de turbulence considérée, les données classiques de l'abri sont en effet plus ou moins représentatives du climat de la surface évaporante.

II. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1°) ÉVAPOTRANSPIROMÈTRES

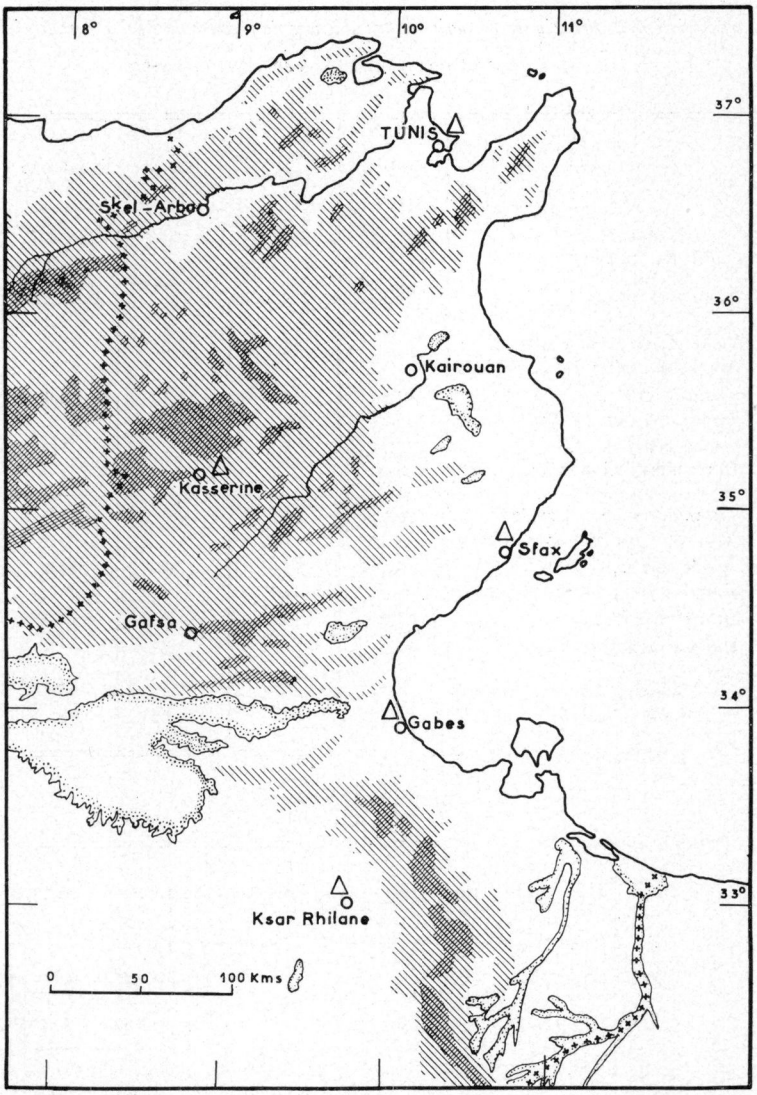
Depuis 1959, 5 postes de mesures climatiques ont été installés sur des parcelles d'expérimentation : Tunis, Melloulèche, Gabès, Ksar Rhilane (influence de la latitude et de la température moyenne) Kasserine (influence du continentalisme) (tableau 1, *a*).

Les pluies mensuelles de l'année 1962 (tableau 1, *b*) sont données, pour les différentes stations de mesures, à titre d'exemple. Elles donnent une idée très approximative, au terme de ruissellement près, de l'Evapotranspiration réelle (ETR) de la région, et offrent une image approchée de l'aridité croissante de Tunis à Ksar Rhilane.

Chaque poste est doté d'un abri météorologique complet : thermomètre, psychromètre, anémomètre, pluviomètre, ainsi que d'un évapotranspiromètre type THORNTHWAITE : cuve de 4 m² de surface et de 0, 70 m de profondeur munie d'un dispositif à niveau constant qui maintient le plan d'eau à 0. 60 m de la surface.

L'ETP journalière est mesurée par différence entre les quantités d'eau excédentaires appliquées quotidiennement en surface et la quantité d'eau drainée le lendemain à la même heure ; le dispositif à niveau constant constitue un volant d'inertie, et fait que le stock d'eau du sol, après chaque irrigation, est sensiblement le même. Les valeurs journalières ainsi obtenues sont relativement peu dispersées, sauf par temps de pluie ou lors d'un brusque changement de régime d'ETP.

Tous les évapotranspiromètres, ainsi que leur anneau de garde de 10 × 10 m, sont couverts de Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*).



TUNISIE

de 200 à 800 m

au-dessus de 800 m

△ stations de mesure de l'E. T. P.

TABLEAU I

Caractéristiques climatiques essentielles des stations de mesure de l'ETP en Tunisie

a) Température, humidité, insolation (1961-62)

		Tunis	Melloulèche (Sfax)	Gabès	Kasserine	Ksar Rhilane
Latitude N Altitude (mètres)		36° 51′ 3	34° 43′ 21	33° 53′ 2	35° 11′ 689	32° 55′ 240
Janvier	Temp. moyenne mensuelle $\bar{\theta}$ ...	11,2	11,0	12,3	9,2	8,7
	Amplitude therm. moyenne mensuelle $\overline{\Delta\theta}$	7,8	13,6	11,1	15,6	14,8
	Temp. du point de Rosée (moy. mensuelle) $\bar{\theta}_r$	7,7	8,5	3,6	1,9	2,1
	Durée d'insolation (h/jour)	5,06		7,49		
Juillet	Temp. moyenne mensuelle $\bar{\theta}$	26,4	26,0	27,7	26,3	29,2
	Amplitude therm. moyenne mensuelle $\overline{\Delta\theta}$	13,2	12,1	12,0	16,3	17,0
	Temp. du point de Rosée (moy. mensuelle) $\bar{\theta}_r$	17,2	19,8	18,9	17,9	11,6
	Durée d'insolation (h/jour) $\bar{I}$	12,28		12,22		
Salure de l'eau d'arrosage des évapotranspiromètres : *P. osmotique* (*atm.*)		0	2,7	1,32	0	2,6

b) Pluies (1962)

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total mm.
Tunis	48,5	63,1	38,5	37,2	13,9	2,6	—	—	16,6	127,5	40,0	56,9	444,8
Melloulèche	3,9	3,0	49,9	58,3	5,4	1,2	—	—	11,0	92,0	74,2	7,7	306,6
Gabès	5,0	0,8	19,3	14,0	—	—	—	—	26,8	0,5	111,1	—	177,5
Kasserine.....	3,5	12,5	47,3	40,0	52,6	16,4	4,3	17,2	28,6	13,9	25,1	0,8	262,2
Ksar Rhilane.....	1,7	0,5	24,5	3,5	—	—	—	—	—	5,0	6,7	13,2	55,1

2°) Mesure au champ de la consommation d'eau de diverses cultures irriguées

A Tunis et à Gabès, les essais ont été conduits pour déterminer les besoins en eau optimaux et maximaux des différentes cultures. Chaque essai comprend plusieurs doses d'irrigation dont l'une consiste à maintenir la culture, par des irrigations fréquentes, à l'ETP.

Les profils hydriques relevés permettent, connaissant ainsi les différents éléments du bilan d'eau, de calculer la consommation réelle à ses différents stades de végétation. On vérifie en outre, qu'il n'y a pas de pertes d'eau par percolation dans les couches profondes du sol.

Depuis 1959, les cultures choisies ont été :

Tunis : sorgho, maïs, coton, orangers, oliviers.

Gabès : sorgho, maïs, coton, luzerne.

(DAMAGNEZ, de VILLÈLE, 1960, 1961, 1962 et travaux non publiés)

3°) MESURES DE RAYONNEMENT SOLAIRE : RAYONNEMENT GLOBAL, DURÉE D'INSOLATION

Ce n'est que récemment que des mesures systématiques de rayonnement solaire global ont pu être entreprises à Tunis (RIOU et de VILLÈLE, 1962). L'installation comprend une pile solarigraphique de KIPP, montée sur un potentiomètre enregistreur MECI doté d'un dispositif intégrateur mécanique (Leeds et Northrup). L'étalonnage de la pile a été effectué par référence à l'échelle internationale (Intern. Pyr. Scale, 1956), au moyen d'un actinomètre de LINKE-FEUSSNER, en comparant, pour ces deux types d'appareils, la composante verticale du rayonnement solaire direct pour différentes hauteurs du soleil.

Après 6 mois d'enregistrement continu, les coefficients de la formule d'ANGSTRÖM, donnant le rayonnement solaire global en fonction du rayonnement théorique maximal R_0, calculé d'après les tables d'ANGOT, et de la fraction d'insolation I, ont pu être obtenus. Ce premier calcul de corrélation a permis d'estimer la radiation globale pour la période antérieure, à Tunis et à Gabès.

$$R_g = \left(0{,}16 + 0{,}59\,\frac{n}{N}\right) \cdot R_o \cdot \text{avec } \frac{n}{N} = I \text{ (fraction d'insolation)}$$

coefficient de corrélation $r = 0{,}90$

4°) MESURES MICROCLIMATIQUES DANS LES OASIS

Depuis 1960, des mesures microclimatiques comparatives sont effectuées à Ksar Rhilane (zone saharienne) simultanément à l'intérieur et à l'extérieur de l'oasis expérimentale (3 ha).

Au cours de l'été 1961, d'autres mesures ponctuelles de température et de tension de vapeur ont été prises au sol et en avion, aux heures les plus chaudes de la journée ; enfin récemment, à 0,50 et à 1,50 m, au-dessus de la surface évaporante (évapotranspiromètres).

III. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

1°) ÉVAPOTRANSPIROMÈTRES

Bien que les conditions climatiques des stations de référence soient très différentes (tableau 1), il est remarquable de constater que les ETP mesurées varient peu d'une station à l'autre, surtout pendant les mois d'été (tableau 2).

L'ETP de Ksar Rhilane en particulier, périmètre irrigué aux confins de la zone saharienne, à température et déficit de saturation de l'air élevés, n'accuse qu'une différence de 10 p. 100 environ par rapport à celle de Gabès, qui est soumis à l'influence maritime.

Les résultats sont donc au premier abord assez surprenants. Tout laissait supposer que l'effet d'oasis serait un facteur dominant de l'ETP dans les régions les plus arides et que les influences microclimatiques y seraient plus importantes que les données du climat général.

En particulier Ksar Rhilane, aurait dû accuser par rapport à Gabès, un effet d'oasis très marqué, puisque l'évaporation nette de la région est pratiquement nulle. (BOUCHET, 1963).

2°) CONSOMMATION D'EAU MAXIMALE DES CULTURES

Les mesures de consommation d'eau maximuale de différentes cultures, effectuées au champ ou en cases lysimétriques, à titre de vérification, concordent d'une façon satisfaisante (tableau 3). La consommation d'eau maximale des différentes cultures

TABLEAU 2

Évapotranspirations potentielles mensuelles

Kikuyu : *Pennisetum clandestinum*

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
					Tunis (Centre d'Étude de l'Eau)							
1959 ..	55	38	80	150	161	185	223	179	159	97	46	42
1960 ..	40	59	78	105	143	170	225	214	145	112	74	44
1961 ..	37	61	99	144	198	192	227	199	151	83	46	45
1962 ..	58	33	74	99	135	177	205	190	139	106	69	53
Moy...	*47*	*48*	*83*	*124*	*159*	*181*	*220*	*195*	*148*	*100*	*59*	*46*
					Gabès (Aïn Zérig)							
1961 ..	—	—	—	142	191	186	218	192	149	114	67	72
1962 ..	71	47	104	127	159	164	212	183	112	101	82	48
					Ksar Rhilane							
1961 ..	—	—	—	—	—	—	251	216	156	117	78	51
1962 ..	35	39	79	131	179	218	255	226	161	102	64	38
					Kasserine							
1961 ..	—	—	—	—	—	182	212	—	—	—	—	59
1962 ..	67	63	115	138	146	171	211	185	132	93	61	—
					Melloulèche (Sfax)							
1961 ..	—	—	—	—	—	140	176	158	105	96	69	54
1962 ..	48	41	66	95	125	144	157	138	117	84	54	—

est sensiblement la même et les écarts sont de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale.

Ce sont les cultures denses et hautes, comme le maïs ou le coton, qui accusent la consommation d'eau la plus élevée, sans d'ailleurs dépasser 10 p. 100 de l'ETP mesurée. Cette augmentation traduit un léger effet de bord, la turbulence étant plus forte au niveau supérieur des cultures.

On doit signaler toutefois une valeur exceptionnelle dans notre série d'essais, à Tunis (1961) dans le cas du coton : une consommation supérieure de 30 p. 100.

Au contraire, les oliviers font apparaître une légère réduction de l'ETR maximale par rapport à l'ETP.

Les résultats du bilan d'eau de diverses cultures, bien alimentées en eau, constituent un test de la qualité des mesures d'ETP effectuées, ainsi qu'une vérification de leur signification climatique, aussi bien pour des cultures gazonnantes continues (Kikuyu, luzerne) que pour des cultures arbustives discontinues. Dans le cas de

TABLEAU 3

Évapotranspiration potentielle mesurée et consommation d'eau maximum de différentes cultures

Tunis (Centre d'Etude de l'eau)	Sorgho (auge-grass)	Maïs		Coton	Orangers		Oliviers	
	1959 Case lysimétrique (15/6-17/9)	1960 Case lysimétrique (12/5-17/8)	1960 au champ (1/6-17/8)	1961 (7/7-5/8)	1960 (15/6-5/12)	1961 (17/4-12/10)	1960 (9/6-13/10)	1961 (5/5-11/10)
ETP (mm)	594	605	505	210	866	1 105	760	990
ETR max. (mm)	567	637	507	276	875	1 054	670	850
ETR/ETP	*0,95*	*1,05*	*1,00*	*1,31*	*1,01*	*0,95*	*0,88*	*0,86*

Gabès (Aïn Zérig)	1960			1961			1962	
	Maïs (24. 5-11/7)	Coton (1/7-5/9)	Tomate (24/10-5/1)	Maïs (26/5-12/7)	Luzerne (3/6-9/11)	Coton (23/6-14/9)	Blé (20/2-17/5)	Luzerne (25/4-20/8)
ETP (mm)	393	562	291	286	617	527	192	688
ETR max. (mm)	429	566	312	317	620	585	212	710
ETR/ETP	*1,09*	*1,00*	*1,07*	*1,11*	*1,00*	*1,11*	*1,10*	*1,03*

l'olivier, l'effet de bord est important à l'échelle d'un arbre, mais étant donné son développement en hauteur, il capte l'énergie disponible sur la zone intercalaire (BOUCHET, 1963). On retrouve donc sensiblement l'ETP climatique définie pour le gazon.

3°) Relation entre l'ETP mesurée et l'évaporation en bac flottant

Si on compare les moyennes mensuelles (série 1959-1962), de l'ETP mesurée à Tunis, avec celles de l'évaporation mesurée en bac flottant, sur le lac de Tunis pendant la période 1924-1932 (Berkaloff, 1952), la corrélation entre les deux est excellente quelle que soit la période de l'année (figure 1) et la linéarité de la relation, même pour

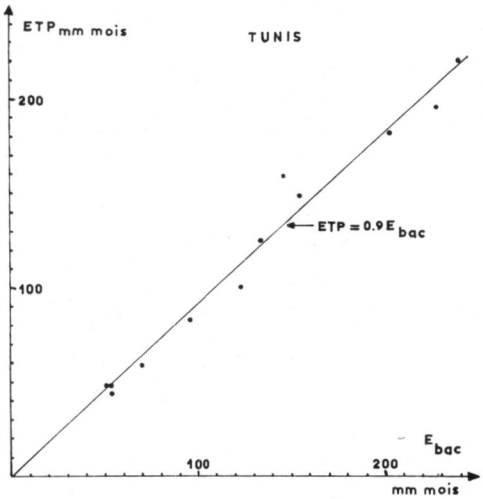


Fig. 1. — *Relation entre l'ETP mesurée (Tunis-Centre d'étude de l'eau,* 1959/62) *et l'évaporation en bac flottant (Lac de Tunis,* 1924/32)

les valeurs les plus élevées, confirme la signification physique et climatique de l'ETP mesurée sur gazon.

On peut en effet penser que l'évaporation mesurée en bac flottant sur le lac de Tunis représente bien, à l'échelle de la région, l'évaporation d'une nappe d'eau libre de plusieurs km² ; ainsi les mesures effectuées dans la région de Tunis, à quelques kilomètres de la mer dans une zone d'ETP moyenne, sur évapotranspiromètres couverts de Kikuyu avec un anneau de garde relativement petit, seraient équivalentes.

Le coefficient angulaire 0,9 de la droite de régression peut aisément s'interpréter par les différences d'albédo et de bilan d'énergie, sur gazon et sur nappe d'eau.

IV. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

1°) Corrélation avec le rayonnement global

Le rayonnement solaire global mensuel a été calculé pour Tunis, Gabès et Kasserine, à partir des données de durée d'insolation, disponibles pour ces trois stations, en appliquant la formule d'Angström dont les coefficients ont été calculés pour Tunis par référence au rayonnement solaire global mesuré. On peut faire à ce sujet deux remarques :

— actuellement nous disposons d'un nombre relativement restreint de données (18 données décadaires). La formule doit donc être mise au point dans l'avenir. Néanmoins la signification statistique des coefficients calculés est relativement bonne puisque la dispersion des valeurs expérimentales est faible ($r = 0{,}90$).

— il est évidemment critiquable d'extrapoler cette formule pour des stations assez éloignées.

Quoi qu'il en soit, le rayonnement global, même ainsi évalué, constitue une valeur approchée intéressante, et est susceptible d'être utilisé. Les résultats font apparaître une bonne corrélation entre le rayonnement global, exprimé en mm d'eau évaporée équivalents (R_g), et l'ETP mesurée pour ces 3 stations.

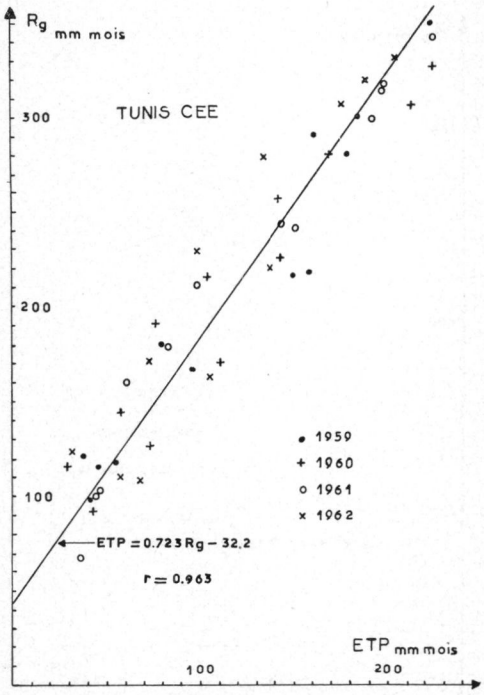


FIG. 2. — *Relation entre le rayonnement global et l'ETP (Tunis, Centre d'étude de l'eau).* 1959 *à* 1962

A Tunis la droite de régression (fig. 2), pour les valeurs mensuelles de 4 années, obéit à l'équation :

$$ETP = -32 + 0{,}72\ R_g \text{ mm/mois}$$
coefficient de corrélation $r = 0{,}96$.

A Gabès et à Kasserine les points (fig. 3), moins nombreux, s'écartent peu de cette droite.

$$ETP = -43 + 0{,}73\ Rg \qquad r = 0{,}99.$$

Nous disposons ainsi, en Tunisie, d'une formule pratique, capable d'évaluer l'ETP à partir du rayonnement global, et donc d'une donnée élémentaire, la durée d'insola-

tion. D'autre part, ces résultats qui mettent l'accent sur l'influence prépondérante du rayonnement global dans le bilan énergétique, sont en accord avec les travaux récents de BOUCHET (1963). Ce dernier a en effet montré que, sous certaines conditions, dans le choix des échelles de surface en particulier, on pouvait écrire :

$$ETP + ETR = (1 - a)\ R_g \qquad \text{où} \qquad a = \text{albédo moyen de la région.}$$

En fait, la droite de régression ne représente qu'une correspondance statistique pour l'année, qui n'a pas nécessairement de sens si on l'applique à des périodes de temps de l'ordre de 24 h, échelle du bilan énergétique. Cependant les travaux de BOUCHET justifient actuellement la recherche de telles corrélations.

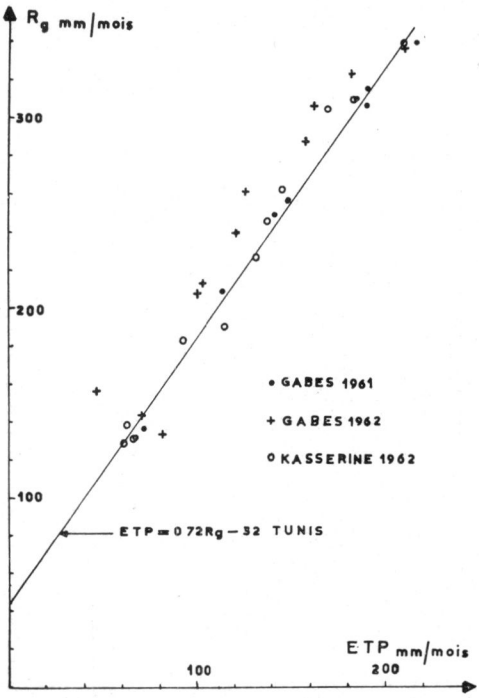


FIG. 3. — *Relation entre le rayonnement global et l'ETP. (Gabès- Kasserine).* 1961-1962

2°) CAS DE L'ETP DES OASIS ET SIGNIFICATION DU DÉFICIT DE SATURATION DE L'AIR

En raison des dimensions réduites de l'oasis de Ksar Rhilane (3 ha), il devient difficile d'utiliser l'équation générale du bilan d'énergie :

$$(1 - a)\ R_g + R_a - \sigma\ T^4 + Q = ETR.$$

En effet, si avec BOUCHET nous adoptons un sytème de référence de l'ordre du km², c'est à dire un système qui intègre les phénomènes de turbulence d'échelle moyenne, de telle sorte que le climat de l'abri météorologique à 2 mètres soit repré-

sentatif du système, le bilan net d'énergie de cette zone est sensiblement nul, puisque à l'échelle régionale l'ETR est voisine de zéro. Sur une oasis de petites dimensions le phénomène d'advection est prépondérant.

Ainsi l'on doit s'attendre, dans les zones désertiques, à ce que l'ETP des petites oasis soit essentiellement fonction des propriétés de la masse d'air, du déficit de saturation de l'air notamment. A titre de comparaison, il aurait été en outre intéressant de pouvoir étudier à Ksar Rhilane, la relation entre l'ETP mesurée et le rayonnement global, mais cette station ne possédant pas d'héliographe, il ne nous a pas été possible d'y évaluer le rayonnement global. En fait, celui-ci doit être un peu supérieur à celui de Gabès ; les ETP étant également un peu supérieures, on peut penser qu'il n'y aurait pas entre R_g et ETP une relation très différente.

Tout se passe alors comme si le bilan d'énergie au-dessus de la zone désertique déterminait, indirectement, les propriétés de la masse d'air, c'est-à-dire le terme d'advection.

Des mesures climatiques et microclimatiques effectuées dans l'oasis ont ainsi conduit à un résultat intéressant .

La comparaison des températures de l'air sous abri θ_a, à l'intérieur du périmètre irrigué et à l'extérieur, dans la zone désertique, montre qu'il a y pratiquement égalité des températures à l'intérieur et à l'extérieur de l'oasis. Le maximum de la journée peut parfois être légèrement plus élevé dans l'oasis (0,5°C environ). Il n'en est pas de même pour la température du point de rosée θ_d systématiquement plus forte dans le périmètre (tableau 4).

TABLEAU 4

Température de l'air et température du point de rosée, sous abri à 2 mètres, à l'intérieur et à l'extérieur de l'oasis de Ksar Rhilane (Moy. 1961-62)

		Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Oasis (1)	θ_a	8,8	10,4	14,0	19,4	24,3	25,8	29,2	27,6	25,2	20,2	15,4	9,6
	θ_d	1,1	1,1	4,1	6,3	8,1	10,9	12,1	14,7	13,4	10,0	5,8	1,6
Zone désertique	θ_a	8,6	10,3	13,8	19,6	24,7	26,4	30,1	27,8	26,0	20,4	15,6	9,3
	θ_d	— 0,2	— 0,1	2,7	4,1	5,6	9,4	8,9	12,7	11,2	8,2	4,7	0,2

(1) Les mesures climatiques dans l'oasis sont effectuées dans une parcelle de cultures annuelles, sans couvert de palmier.

Ceci est d'ailleurs en accord avec d'autres observations effectuées :

— Des observations ponctuelles réalisées par journées très chaudes (maximum de l'ordre de 50°C) sous le couvert des palmiers et à l'extérieur d'une oasis continentale (Kebili) montrent que même la température de l'air serait légèrement supérieure à l'intérieur (DAMAGNEZ, BOUCHET, de PARCEVAUX).

— Les mesures de BALDY (1963) dans une oasis de dimensions moyennes (140 ha), du sud algérien, confirment ces observations.

Plus récemment, à Ksar Rhilane, les mesures de température et de tension de vapeur à 0,50 et 1,50 m au-dessus d'un évapotranspiromètre, font apparaître les faits suivants :

— Il existe un gradient de température qui correspond à un transfert de chaleur de la couche 0,50 vers la couche 1,50 m.

— Il existe à ces mêmes niveaux un gradient de tension de vapeur qui correspond à l'évapotranspiration.

— Par ailleurs, le bilan énergétique nous montre que l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration est essentiellement fournie par l'air ; il existe donc au-dessus de la surface évaporante une inversion de température permettant un apport advectif de chaleur vers celle-ci. C'est ce que confirment des mesures de température à la surface des sols irrigués.

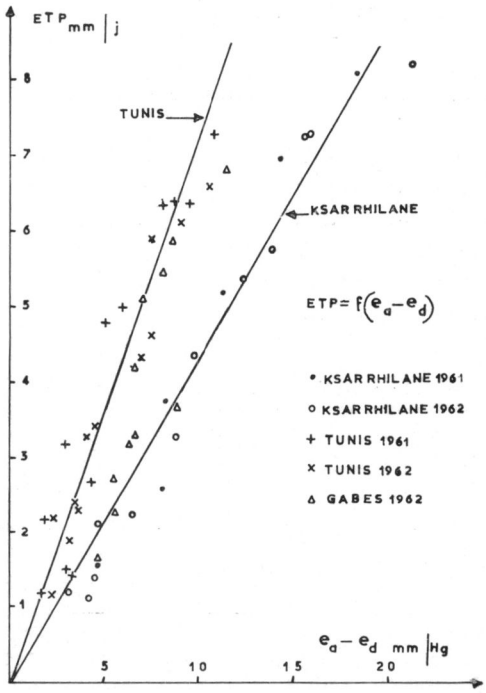


FIG. 4. — *Relation entre le déficit de saturation de l'air et l'ETP à Tunis, Gabès et Ksar Rhilane*

Ainsi l'existence d'une petite oasis telle que Ksar Rhilane, au sein d'une vaste région désertique, déterminerait une surface d'échange thermique avec l'air relativement basse (elle se trouve à moins de 0,50 m du sol). Au-dessus de cette surface le profil thermique s'inverserait. A 2 mètres les températures sont identiques dans l'oasis et sur le désert. Par contre, la tranche d'atmosphère dont le taux d'humidité est modifié est considérablement plus épaisse dans l'oasis entourée de brise-vent, et le psychromètre dans l'abri météorologique enregistre ces fortes différences d'humidité.

Ceci pose le problème de la signification des mesures sous abri et illustre la

notion d'échelle, classique en météorologie et rappelée récemment par BOUCHET (1963).

Comme il a été dit plus haut, le rayonnement net étant faible, l'apport advectif d'énergie compense plus ou moins exactement le transfert de vapeur. On est alors amené à rattacher celui-ci au déficit de saturation, ou plus exactement à l'évaporation d'une surface qui serait à la température de l'air. La formule de PENMAN conduit naturellement à une telle recherche.

$$\mathrm{ETP} = \frac{\Delta\, R_n}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma\, E_a}{\Delta + \gamma}.$$

En zone aride, R_n devient faible, et le premier terme de l'équation est négligeable devant le terme en E_a : la relation entre ETP et E_a devient alors plus serrée. Or l'équation de diffusion de la vapeur d'eau dans la couche limite s'écrit :

$$E_a = D\, \frac{e_a - e_d}{\delta z}$$

où δz est l'épaisseur de la couche limite de transfert de vapeur, et une fonction de la turbulence. En toute rigueur, on ne peut rattacher ETP à $(e_a - e_d)$ sans inclure la turbulence. On la supposera constante à l'échelle du mois en première approximation. On aboutit en effet, à une bonne corrélation entre $(e_a - e_d)$ et ETP ; la droite de régression (fig. 4) a pour équation :

$$\mathrm{ETP}_{\mathrm{mm/jour}} = 0{,}43\ (e_a - e_d)_{\mathrm{mmHg}}$$

Il a paru alors intéressant de rechercher de telles corrélations pour Tunis et Gabès, avec les mêmes réserves en ce qui concerne l'influence de la turbulence.

La corrélation à Tunis est plus lâche et le coefficient angulaire de la droite de régression est beaucoup plus grand :

$$\mathrm{ETP}_{\mathrm{mm/jour}} = 0{,}72\ (e_a - e_d)_{\mathrm{mmHg}}.$$

A Gabès, les valeurs de ETP se répartissent suivant les saisons, soit sur la droite de Ksar Rhilane, soit sur celle de Tunis (fig. 4).

BOUCHET donne une interprétation simple de ces résultats : Le bilan d'énergie peut en effet s'écrire

$$R_n = \mathrm{ETR} - Q$$

$$\text{il pose } \frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \varepsilon \text{ indice d'évapotranspiration relative}$$

$$R_n = \varepsilon\, \mathrm{ETP} - Q.$$

On a alors dans la formule de PENMAN :

$$\mathrm{ETP} = \frac{\Delta\, (\varepsilon\, \mathrm{ETP} - Q)}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma\, E_a}{\Delta + \gamma}$$

soit

$$\mathrm{ETP} = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma - \Delta\, \varepsilon}\, E_a - \frac{\Delta\, Q}{\Delta + \gamma - \Delta\, \varepsilon}.$$

En admettant que Q reste faible devant E_a on a finalement :

$$ETP \# \frac{\gamma}{\Delta + \gamma - \Delta\varepsilon} E_a.$$

Or plus l'aridité de la région est grande plus le terme $\frac{\gamma}{\Delta + \gamma - \Delta\varepsilon} = \alpha$ est faible Il varie d'ailleurs dans les limites :

$$\varepsilon = 1 \qquad \alpha = 1$$
$$\varepsilon = 0 \qquad \alpha = \gamma/(\Delta + \gamma)$$

On comprend donc que le coefficient de régression de la droite $ETP = f(e_a - e_d)$ passe de 0,43 à 0,72, de Ksar Rhilane à Tunis région d'ETR moyenne. A Gabès, il semble que les résultats soient liés au régime des vents qui soufflent du continent en hiver et s'inversent en été en venant de la mer. Ainsi Gabès se comporterait alternativement comme une station continentale à ETR. faible ou comme une station maritime comparable à Tunis.

En fait, si les raisonnements précédents nous expliquent les sens de variation de $ETP/(e_a - e_d)$ suivant la station, ils ne permettent pas d'interpréter l'ensemble des résultats. Nous n'avons pas tenu compte de la turbulence. Celle-ci est en fait peu variable à Tunis et voisine de 1,8 m/sec à une hauteur de 2 m. A Ksar Rhilane, elle atteint cette valeur dans l'oasis en été, mais s'abaisse à 1 m/s en hiver (influence des brise-vent). D'autre part Δ varie fortement, du simple au double, suivant la température. On comprend donc mal, même s'il y a des compensations, que $ETP/(e_a - e_d)$ soit à peu près constant toute l'année.

Quoi qu'il en soit, ces résultats nous ont paru intéressants, car ils permettent de dégager une interprétation climatique du déficit de saturation de l'air sous abri, considéré généralement comme étant dénué de signification physique. Ils suggèrent également une possibilité d'estimation correcte de l'ETP dans les petites oasis.

V. — CONCLUSIONS

De l'ensemble des mesures effectuées on peut tirer les conclusions suivantes :

A Tunis, les mesures d'ETP, vérifiées par les bilans d'eau des cultures irriguées et comparées à l'évaporation d'une nappe d'eau libre, traduisent indéniablement le climat local.

Sur le plan général, une petite oasis, telle que Ksar Rhilane, modifie le climat à une échelle telle, que les mesures classiques de l'abri météorologique y sont peu représentatives. C'est là un point important, classique en météorologie, mais parfois oublié en climatologie. Les différentes formules utilisant les données de l'abri, ne s'appliquent en effet que lorsque ce dernier est représentatif du climat réel des surfaces évaporantes.

D'un point de vue pratique, on constate en Tunisie que l'ETP est peu variable pour des stations aussi différentes que Tunis, Gabès et Ksar Rhilane. Les résultats de Ksar Rhilane en particulier sont, à cet égard, assez surprenants.

La formule de PENMAN

$$ETP = \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

traduit d'ailleurs relativement bien cet effet d'équilibre.

Si l'ETR de la région n'est pas négligeable ou si cette zone est soumise à l'influence dominante des masses d'air marines, le rayonnement net de la région considérée est appréciable. Le premier terme de l'équation de PENMAN est alors prépondérant.

Au contraire, si l'ETR de la région est nulle et si la zone irriguée est de petites dimensions, le rayonnement net au-dessus de cette région est voisin de zéro. L'ETP est alors, au terme de turbulence près, en corrélation étroite avec le déficit de saturation de l'air.

Sur le plan agronomique, ceci nous conduit à envisager de chiffrer le rôle des brise-vent, sur la réduction de consommation d'eau des cultures, différemment selon le degré d'aridité. En se référant aux deux termes de l'équation de PENMAN et aux résultats de nos mesures, on peut penser que l'efficacité des brise-vent pour réduire l'ETP, sera relativement faible à Tunis, cependant qu'elle sera maximale dans le Centre et le Sud tunisien, régions où l'ETR reste faible même en hiver.

Reçu pour publication en mai 1963.

SUMMARY

PROBLEMS OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN TUNISIA

The study of potential evapotranspiration in Tunisia leads to analyse the respective parts played by radiation and convection.

In Tunisia, potential evapotranspiration is in close relation with the global radiation absorbed.

ZUSAMMENFASSUNG

PROBLEME ÜBER POTENTIELLE EVAPOTRANSPIRATION IN TUNESIEN

Das Studium der potentiellen Evapotranspiration in Tunesien führt zur Analyse der radiativen oder konvektiven Beiträgen.

In Tunesien ist die potentielle Evapotranspiration in sehr guter Beziehung mit der global absorbierten Strahlung.

РЕЗЮМЕ

Проблемы потенциальной эвапотранспирации в Тунисе.

Ж. ДЭМАНЬЕЗ, К. РИУ, О. ДЭ ВИЕЙ, С. ЭЛЬ-АММАМИ. Биоклиматологическая Секция Национального Института Сельскохозяйственных Изследований в Тунисе

Изучение потенциальной эвапотранспирации в Тунисе приводит к анализу относительного участия радиативных и конвективных вкладов.

В Тунисских масштабах имеется хорошее соотношение между потенциальной эвапотранспирацией и общим количеством поглощенного излучения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERNARD E. A., 1956. Le déterminisme de l'évaporation dans la nature. *Publ. I. N. E. A. C., ser. sci.*, n° 68.

BERKALOFF R., 1952. Évaporation d'eau dans le lac de Tunis. *Note B. I. R. H., Direction des travaux publics. Tunis.*

BOUCHET R. J., de PARCEVAUX S., 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'évapotranspiration potentielle au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 13, 686-694.

DAMAGNEZ J., de VILLELE O., 1959. Besoins en eau d'une culture d'orangers. Influence de la salure et de l'enracinement. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie*, **32**, 159-180.

DAMAGNEZ J., 1960. Le sol, l'eau et la plante : quelques problèmes de Bioclimatologie. *Tunisie agric.*, **61**, 3, 39-55.

DAMAGNEZ J., de VILLELE O., 1961. Les besoins en eau réels des cultures et les possibilités d'utilisation des réserves d'eau du sol en Tunisie. Influence de la salure. *Ann. agron.*, **12**, 109-120.

DAMAGNEZ J., de VILLELE O., 1962. Besoin en eau des oliviers. Comportement de l'olivier à l'irrigation soit à l'eau douce soit à l'eau salée. *Ann. Inst. nat. Rech. agron. Tunisie* (en cours de parution).

TANNER C. B., LEMON E. R., 1962. Radiant energy utilized in evapotranspiration. *Agron. J.* **54**, 207-212.

RIOU Ch., de VILLELE O., 1963. Note technique sur l'utilisation des solarimètres de MOLL-GORCZYNSKY pour la mesure du rayonnement solaire global. *Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie.*, 7/1 (Ronéotypé).

ADDENDUM

Références se rapportant aux Annales agronomiques, n°s 4 et 5, 1963.

BALDY Ch., 1963. Cultures associées et productivité de l'eau. *Ann. agron.* 1963, **14** (4).

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle et potentielle. *Ann. agron.* (*en cours de parution*).

Ann. agron., 1963, **14** (4), 559-569.

QUANTITÉS D'EAU D'IRRIGATION PAR RAPPORT AUX DONNÉES DE L'APPAREIL PICHE SOUS ABRI [1]

L. A. REISS

Station de Recherches agronomiques, Rehovoth (Israël)

SOMMAIRE

Les quantités d'eau optimales à fournir par irrigation peuvent être définies sous le climat d'Israël, et probablement dans des régions, où le climat diffère complétement, à partir de l'évaporation sous abri (mesurée sur évaporomètre PICHE).

Le dépouillement d'un certain nombre d'essais d'irrigation permet d'établir des relations simples et commodes entre le rapport H/P (de la quantité d'eau apportée H à l'évaporation P), le degré de fertilisation du sol et l'humidité du sol atteinte avant l'irrigation.

Il est reconnu aujourd'hui par les spécialistes en matière d'irrigation que les besoins en eau dépendent d'une manière prépondérante du pouvoir d'évaporation de l'air.

Nous désirons cependant faire remarquer dans ce travail que l'ordre de grandeur des besoins en eau, tout en étant fonction du climat, dépend aussi de facteurs supplémentaires. La connaissance de ces facteurs permettra la détermination plus exacte des besoins en eau.

Un de ces facteurs sera en fin de compte le genre de cultures, puisque c'est lui dont dépend la limite minimale du taux d'humidité du sol, au-dessous de laquelle celui-ci ne doit pas descendre.

Un autre facteur est constitué par le milieu de développement dans lequel

[1] L'analyse présentée dans cet article nous a été permise grâce à MM. le Dr J. RUBIN et le Dr A. SHMUELI, Directeurs de la Division « Sol et Eau », de l'Institut national et universitaire d'Agriculture d'Israël, ainsi qu'aux chercheurs de ladite Division, qui ont mis à notre disposition du matériel expérimental et nous ont communiqué les résultats de leurs recherches. Nous tenons, donc, avant toute chose, à exprimer notre gratitude à MM. le Dr RUBIN, le Dr A. SHMUELI et aux chercheurs de la Division, dont les noms seront signalés plus loin.

une culture donnée se trouve placée : les conditions thermiques de l'air et du sol, l'humidité relative de l'air, la luminosité, la fertilité du sol, la place de la culture dans le rythme de l'assolement. Ces deux facteurs sont les plus importants à considérer.

Nous avons utilisé pour la rédaction de cet article des données empruntées au matériel fourni par les chercheurs mentionnés ci-dessus en ce qui concerne l'humidité du sol et les quantités d'eau fournies en irrigation. Pour les données climatiques, nous en sommes redevables au Service de Météorologie d'Israël.

Le matériel expérimental de chacun de ces chercheurs constitua une série de traitements : 5 à 8 régimes d'eau différents, toutes les autres conditions restant identiques.

Nous avons choisi, dans chaque série d'essais, un traitement dont le résultat se révélait le meilleur au point de vue agricole.

Il est à noter cependant que l'essai de D. SHIMSHI concernant la recherche en matière d'interaction porte sur deux facteurs : l'humidité du sol et sa productivité, celle-ci étant représentée par des doses différentes d'engrais azotés.

Nous avons analysé tous les traitements de cet essai et le résultat de cette analyse est donné en figure 2 (p. 565).

Dans notre précédent article [1] nous avons mentionné avoir trouvé que, pour tous les champs qui se distinguaient au point de vue de leurs rendements et dans lesquels les quantités d'eau fournies n'étaient pas exagérées, le rapport (H/P) était toujours environ 0,6 (H indiquant la quantité d'eau totale en mm, P l'évaporation PICHE sous abri en mm).

Nous nous sommes servis de ce rapport (0,6) pour déterminer les quantités d'eau à fournir dans chaque région, en prenant en considération les diversités de conditions aussi bien du point de vue climatique que du point de vue sol et culture.

En analysant les résultats obtenus par les agriculteurs, nous disposions alors des données sur les rendements, sur les quantités d'eau appliquées en irrigation, ainsi que les données sur l'évaporation PICHE. En ce qui concerne l'humidité du sol, les données nous manquaient.

Notre présent travail comblera cette lacune dans une certaine mesure, puisqu'il se base sur le prélèvement du sol en ce qui concerne l'humidité.

La figure 3 donne schématiquement deux régimes qui sont essentiels pour la réussite des cultures : celui de l'humidité du sol et celui de la fertilité, la fertilité du sol représentant dans ce cas, en vue de simplification, l'ensemble du milieu d'existence précédemment défini.

Nous estimons que l'élaboration d'une échelle portant numériquement l'ensemble des conditions du milieu d'existence, ainsi qu'une seconde échelle de classification des différentes cultures sur leur degré de mésophytisme permettrait de déterminer d'une façon plus exacte les besoins en eau.

Cette seconde échelle indiquerait à l'avance d'une façon approximative le minimum d'humidité du sol qui ne doit pas être dépassé.

A l'aide de ces deux échelles numériques, on pourrait déterminer d'une manière

[1] Essai de détermination des quantités d'eau nécessaires aux champs cultivés en se basant sur les données météorologiques. Ann. agron., nov.-déc. 1939, 810-816.

précise l'indice d'irrigation à utiliser selon le cas. Cet indice sera exprimé par le rapport H/P, comme nous l'avons déjà signalé.

Dans notre analyse nous nous sommes seulement préoccupés de la couche du sol de 0-90 cm, ayant trouvé que l'état d'humidité régnant dans cette couche, traduisait d'une manière très satisfaisante le régime d'eau donné (d'après les sondages).

Toutefois nous ne présentons pas, dans l'analyse qui va suivre, de calculs d'évapotranspiration, mais nous nous servirons uniquement de données sur les quantités d'eau totales fournies, bien que les chercheurs en matière d'irrigation, aient l'habi-

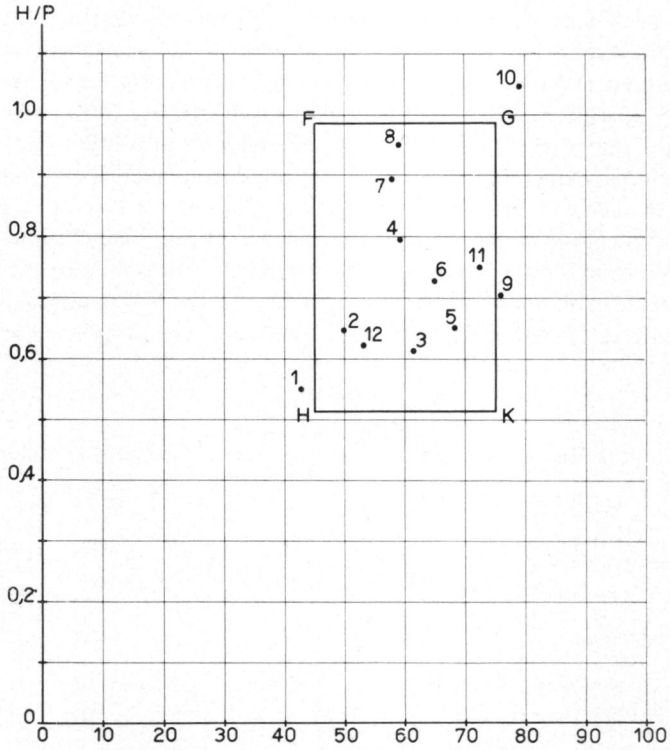


FIG. 1. — *En abscisses : Limite inférieure de l'humidité du sol* (*p.* 100 *de la capacité au champ*)
— *En ordonnées :* Rapport H/P
H = *Irrigation* (*en mm*).
P = *Évaporation Piche sous abri* (*en mm*). (*Données figurant au tableau* 2.)

tude d'exprimer les besoins en eau en termes d'évapotranspiration. Mais alors on est obligé d'ajouter des indications supplémentaires et notamment la valeur du rapport $\frac{\text{Évapotranspiration}}{\text{quantité d'eau totale fournie}}$ (ce rapport exprimant le pourcentage d'eau totale utile).

Les calculs de l'évapotranspiration, même en cas d'un régime d'irrigation bien réglé, démontrent que les valeurs d'évapotranspiration sont toujours inférieures à celles des quantités d'eau totales qui avaient été fournies. Par la quantité d'eau totale nous entendons la quantité globale administrée, à la seule condition qu'il n'y ait pas d'écoulement d'eau hors du terrain irrigué et qu'il n'y ait pas d'infiltration au-delà de la profondeur voulue.

Dans le cas d'une irrigation bien réglée, le pourcentage d'eau qu'on retrouve dans le sol (d'après les données des sondages) égale à peu près 80 p. 100 de la quantité d'eau fournie. Ce pourcentage varie d'un cas à l'autre, mais nous pouvons, dans notre cas, accepter la valeur 80 p. 100 sans risquer de commettre une erreur grave.

Il n'y a pas en Israël de précipitations atmosphériques pendant l'été. Donc il n'y a pas de quantités d'eau supplémentaires s'ajoutant à celles qu'on applique en irrigation. Ce fait contribue à simplifier dans une certaine mesure l'étude du problème des quantités d'eau en irrigation.

Le but principal de notre recherche est de libérer l'agriculteur (1) (et non pas le chercheur) de l'obligation de pratiquer des prélèvements de sol, tout en sachant très bien quand appliquer l'irrigation, et cela grâce à la corrélation possible entre les besoins en eau et un indicateur météorologique proposé. La nécessité des sondages oblige l'agriculteur à faire un travail supplémentaire. Nous visons donc à la recherche d'un indice qui puisse être immédiatement utilisable par l'agriculteur praticien à n'importe quel moment, et qui soit applicable quelles que soient les conditions de climat, de sol et les cultures.

Nous verrons par la suite que, conformément à l'une des conclusions de D. SHIMSHI (2) dans son essai d'interaction, il existe une certaine dépendance entre la quantité d'eau consommée et le degré de fertilité du sol qui nous oblige à admettre que l'indice d'irrigation est fonction de certaines caractéristiques propres au sol.

TABLEAU I

Préparation des coordonnées
(Essai de J. HELLER et A. SHMUELI, signalé sous la référence 9 au tableau 2)

Date du prélèvement du sol précédant l'irrigation	24/6	10/7	25/7	10/8	23/8	1/11
(H) Quantité fournie (mm)		74,0	141,0	141,0	133	158
Taux d'humidité du sol (0-90 cm). (Limite inférieure p. 100 du poids sec		27,1	27,5	28,5	27,2	20,8
Nombre de jours (entre deux irrigations consécutives)		16	15	16	13	70
(P) Évaporation (PICHE sous abri) cumulée (mm)		188,0	189,5	178,2	136,0	647,1
H/P		0,394	0,744	0,790	0,977	0,254
H/P (24/6–23/8)			0,707			—
Limite inférieure du taux d'humidité 24/6/, 23/8 (p. 100 du poids sec)			27,6			—
La même en p. 100 de la capacité du champ			76,6			57,8

(1) The determination of water requirement by using evaporation data. Bull. Res. Counc. Israel, Sect. G, Geo-Sciences, Vol. 11, G 1962.
(2) Communication personnelle.

Dans les diagrammes qui vont suivre, le rapport $\frac{\text{eau d'irrigation}}{\text{évaporation PICHE}}$ sera porté en ordonnées, tandis qu'en abscisses, sera portée la limite inférieure du taux d'humidité du sol, celle-ci étant exprimée en p. 100 de la capacité au champ.

Ainsi pourra-t-on réunir sur un même diagramme des points appartenant à des essais différents sur des sols divers.

Quant à la notion de limite minimale du taux d'humidité, elle s'applique à la couche 0-90 cm au moment qui précède l'application d'eau.

TABLEAU 2

Quelques détails sur les traitements analysés

Référence du traitement (1)	1	2 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Culture et référence de son traitement	Sorgho T/5 serré	Cotonnier T/2 T/3	Arachide T/3	Coton T/3	Arachide T/3	Maïs 4/C	Cotonnier T/5	Cotonnier T/6	Maïs 5/C	Cotonnier T/8	Sorgho T/4
Lieu d'expérimentation	Gilath	Shlouhoth	Gilath	Shlouhoth	Beth Dagan	Gilath		Afoula	Gilath	Afoula	Gilath
Lat. N Long. E Hauteur m	31°20′ 34°40′ 150	32°29 35°29 – 110	(= 1)	(= 3)	32°0′ 34°50′ 40	(= 1)		32°36 35°17 60	(= 1)	(= 9)	(= 1)
Capacité au champ	18,5	28,0	18,5	28,0	26,6	18,5	18,5	36,0	18,5	36,0	18,5
Flétrissement	7,5	16,5	7,5	16,5	16,0	7,5	7,5	21,0	7,5	21,0	7,5
Poids spécifique	1,3	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2	1,3
Période considérée	10/6 6/6 – 6/7 – 14/8 1959 1960	18/5 – 7/9 1960	7/5 – 24/8 1960	26/5 – 3/9 – 1959	12/6 – 5/9 1960	3/6 – 11/8 1958	8/6 – 18/8 1959	24/6 – 23/8 1960	30/5 – 18/7 1960	5/7 – 9/8 1961	23/5 – 2/7 1961
Valeurs	Taux d'humidité (Limite inférieure) % de cap. au champ :										
Abscisse	43,4 49,7	61,7	58,4	68,0	64,9	57,9	58,8	76,6	78,6	72,6	52,7
	indice d'irrigation (H/P) en p. c. d'évaporation Piche										
Ordonnée	54,4 63,8	61,4	79,6	63,8	72,9	89,0	94,7	70,6	104,1	74,8	62,3

(1) Cette même référence sert dans les diagrammes, et de même elle s'applique aux auteurs de l'essai d'irrigation correspondant comme il suit :

1) H. BIELORAI, A. REISS, J. ARNON, J. RUBIN,
2) H. BIELORAI, M. ZUR ; 3, 5) M. OPHIR, A. SHMUELI,
4) H. BIELORAI, A. RAVITS, A. GOLDIN, A. REISS,
6) A. MANTEL, A. GOLDIN, 7, 10) D. SHIMSHI, 8) H. BIELORAI.
9, 11) J. HELLER et A. SHMUELI,
12) H. BIELORAI, J. ARNON.

Ce sont ces chercheurs que nous avons mentionnés tout au début de cet article, et auxquels nous devons tout ce matériel.

Les valeurs de l'humidité qui ont été indiquées dans les diagrammes représentent des valeurs moyennes déterminées pour les périodes considérées (tab. 2).

D'une manière générale la période considérée s'étend de la différenciation (de la série donnée des traitements) jusqu'à la dernière irrigation. La quantité d'eau fournie en dernier lieu n'a pas été incluse dans l'analyse.

A titre d'exemple, nous allons procéder (tableau 1) à l'étude des coordonnées d'un point qui correspond à l'un des essais analysés. Ces coordonnées sont utilisées figure 1. On remarquera que la période qui suit la dernière irrigation n'a pas été incluse dans l'analyse.

Dans le tableau 2 nous présentons quelques détails concernant les traitements analysés (voir aussi fig. 1).

Dans le tableau 3 sont présentées les coordonnées correspondant à tous les traitements de l'essai d'interaction de D. SHIMSHI.

TABLEAU 3

Coordonnées de tous les traitements de l'essai d'interaction de D. SHIMSHI

	Limite inférieure du taux d'humidité en p. 100 de la capacité au champ					Indice d'irrigation : (H/P) (en p. c. d'évaporation Piche)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	50,8	44,3	43,2	41,6	42,1	46,6	52,8	53,5	55,6	55,1
2	59,1	49,6	48,0	48,0	48,1	50,2	63,7	64,6	65,8	65,1
3	64,8	59,1	54,2	51,9	54,8	65,5	77,3	84,6	90,1	84,6
4	72,1	62,2	60,5	58,6	63,0	67,1	92,3	94,2	98,8	91,6
5	83,4	80,2	78,6	79,0	75,5	81,6	95,6	104,1	116,8	119,1

Sur la figure 1 ne sont groupés que les traitements (un de chaque série) qui se distinguaient par les meilleurs résultats obtenus au point de vue agronomique. On remarquera que nous avons inclus sur le diagramme le traitement 5 C de l'essai d'interaction de S. SHIMSHI (C représentant la dose d'engrais généralement adoptée en Israël).

Il ressort de la figure 1 les faits suivants : le lieu géométrique de tous les points tend à se trouver à l'intérieur du rectangle FGHK, ce rectangle étant défini d'une part par une étendue du rapport (H/P) d'environ 0,5 à 1,0, et d'autre part par l'étendue de la limite inférieure du taux d'humidité du sol (pour la couche 0-90 cm), celle-ci étant d'environ 45 à 75 p. 100 de la capacité au champ.

Les points marqués dans ce diagramme appartiennent aux cultures qui diffèrent bien entre elles.

Nous constatons en premier lieu que l'indice d'irrigation (H/P) varie pour ces cultures différentes et aussi pour une même culture placée dans des conditions différentes.

La limite inférieure du taux d'humidité varie aussi d'un cas à l'autre.

Il est à constater que la variation de ces deux facteurs est assez bien délimitée quand il s'agit d'un régime d'eau régulier.

Il se pose la question de savoir quelle est la cause de la fluctuation des points examinés à l'intérieur du rectangle (fig. 1) et quelle est l'étendue même de cette fluctuation ?

Nous constatons que sur les douze points examinés, l'étendue de variation de la limite inférieure du taux d'humidité est 55 à 70 p. 100 de la capacité au champ

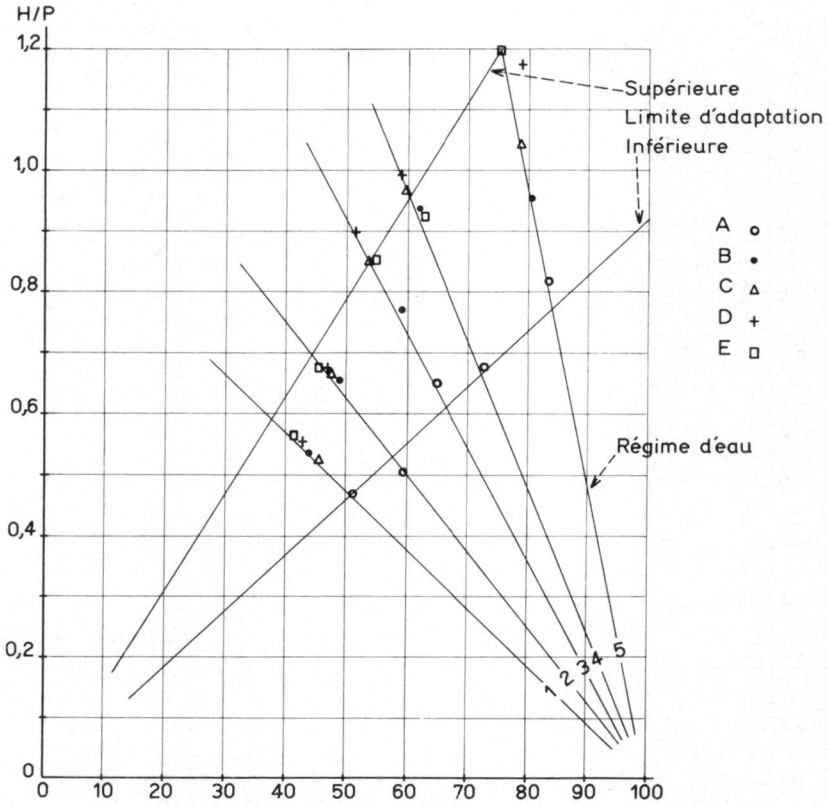


FIG. 2. — *Abscisses et ordonnées : comme dans la fig. 1*
Diagramme représentant l'ensemble des traitements de l'essai d'interaction de D. SHIMSHI (tableau 3)

pour six des points. Dans trois cas, elle est de 70 à 78 p. 100, et dans trois autres cas elle n'est que 40 à 55 p. 100.

En consultant le tableau 2 et en même temps la figure 1, nous constatons que la valeur la plus basse (de la limite inférieure du taux d'humidité) appartient au sorgho, culture qui résiste fortement à la sécheresse, et que la valeur la plus élevée appartient au maïs.

Si nous pouvions classer nos cultures d'après leur degré de « mésophytisme », et assigner des valeurs numériques propres à chaque culture, nous aurions constaté probablement que le sorgho se trouverait assigné à l'échelon le plus bas de la classification, et le maïs, au contraire, à l'échelon le plus élevé, conformément à ce qui

se passe sur la figure 1 : les coordonnées du sorgho et du maïs se trouvent respectivement au voisinage du point H, et du point G.

Sur la figure 2 sont réunis les points correspondant à tous les traitements de l'essai d'interaction de D. SHIMSHI. Les chiffres de 1 à 5 nous offrent les divers régimes d'eau, tandis que les lettres de A à E les divers régimes de la productivité du sol, représentés par des doses variées d'engrais azotés : A sans engrais,

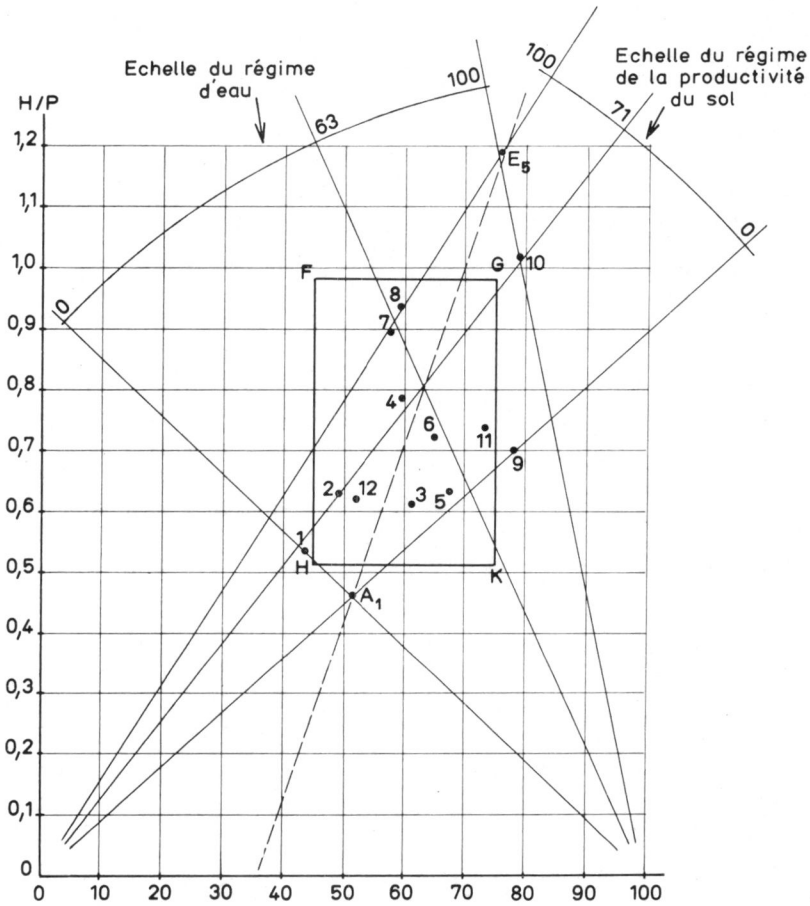


FIG. 3. — *Abscisses et ordonnées : comme dans les fig. 1 et 2*
Diagramme faisant apparaître les influences des deux régimes (régime eau et régime productivité du sol)

C dose correspondant à peu près à celle généralement pratiquée par les agriculteurs d'Israël, D et E représentant des doses beaucoup plus élevées.

Il ressort de l'étude de ce diagramme :

1°) que tous les traitements de fertilité (A — E) appartenant au même traitement d'humidité se trouvent sur une même droite ;

2°) que toutes les droites ainsi obtenues convergent vers un foyer commun ;

3°) que le foyer commun se trouve être le point d'abscisse dont la valeur est la capacité au champ ;

4°) qu'à mesure qu'on avance de A vers E sur chacune des droites, la limite inférieure du taux d'humidité tend à décroître, tandis que le rapport (H/P) (indice d'irrigation), inversement, tend à s'accroître et, conformément aux résultats obtenus par D. SHIMSHI, déjà mentionnés, à mesure que le régime d'eau devient de plus en plus modéré, les points de B à E tendent à baisser et à se rapprocher les uns des autres ainsi que du point A, de manière qu'il s'impose clairement un ajustement convenable entre les deux régimes (le régime d'eau et celui du milieu d'existence dans lesquelles la culture donnée se trouve placée) : et cela explique dans une certaine mesure la variation obligatoire de l'indice d'irrigation énoncé ;

5°) que la tendance linéaire précédemment signalée nous permet d'en tirer une conclusion intéressante, et notamment que, même dans le cas où l'on ne dispose que d'un seul point représentant un traitement unique et quelconque, on peut parfaitement tracer une droite passant par ce point et par le foyer commun.

Cette droite représentera le lieu géométrique de tous les degrés possibles de la fertilité du sol, appartenant tous au régime d'humidité du point nous ayant servi de point de départ ;

6° qu'en traçant à partir du foyer commun (le point sur l'abscisse qui marque la capacité au champ) des rayons par les points A1 et E5 (fig. 3), et en les unissant au moyen d'un arc, nous obtenons une échelle pouvant servir à l'évaluation numérique en régime d'humidité d'un point quelconque se trouvant à l'intérieur du rectangle FGHK (fig. 1).

Nous constatons par exemple (fig. 3) qu'à la majorité des points examinés correspond la valeur de 63 p. 100 environ sur cette échelle ;

7°) que d'autre part en traçant des rayons ayant pour centre le point d'origine (fig. 2) par ces mêmes points (E5 et A1) nous obtenons, semble-t-il, des lignes déterminant la limite d'adaptation possible entre le régime de fertilité du sol et le régime d'humidité.

On remarquera que la limite supérieure de cet ajustement entre les deux régimes tend à baisser à mesure que les valeurs du régime d'eau baissent, alors que d'autre part la limite inférieure d'ajustement tend à s'élever avec le régime montant d'humidité ;

8°) qu'en unissant ces deux rayons qui partent du point d'origine (lignes de limite d'ajustement) au moyen d'un arc, nous obtenons, semble-t-il, une échelle de graduation permettant d'évaluer « l'ensemble du milieu d'existence ».

Donc, un point donné à l'intérieur du rectangle FGHK sera défini en connaissant les valeurs lui appartenant lues sur les deux échelles.

Il va sans dire que, pour se servir de ces échelles schématiquement présentées, il faudra connaître au préalable la valeur de la limite inférieure d'humidité du sol propre à une culture donnée, c'est-à-dire qu'il faudra connaître la valeur numérique de la culture même, d'après une classification sur le degré de « mésophytisme » des cultures mentionné auparavant.

De même il faudra évaluer au préalable le degré de productivité du sol d'après une échelle de classification réelle.

Probablement on devra se contenter d'une classification plutôt modeste, ayant pour échelle des valeurs de 0 à 10, au lieu de 0 à 100, comme le présente le diagrame n° 3.

Nous constatons que l'étendue de la fluctuation possible de valeurs (H/P) en régime

d'irrigation bien réglé est de 0,5 à 1,1 environ, tandis que la limite inférieure du taux d'humidité varie de 45 p. 100 à 75 p. 100 environ de la capacité au champ.

Il ressort de la comparaison directe des régimes d'eau divers d'une série quelconque d'essais qu'à mesure que l'indice (H/P) devient de plus en plus élevé, la limite inférieure d'humidité tend à s'élever et vice versa.

Cela ne contredit pas ce qui a été signalé auparavant, notamment que, pour un régime d'eau donné, la limite inférieure d'humidité va en s'abaissant à mesure qu'augmentent la productivité du sol et la quantité d'eau consommée (essai d'interaction).

On remarquera qu'en prolongeant la droite A1 — E5 jusqu'à son intersection avec l'abscisse, le point d'intersection s'approche du point qui marque 40 p. 100 environ de la capacité au champ, valeur qui correspond à peu près au point de flétrissement du sol à Gilath.

Il semble que la droite A1 — E5 présente le lieu géométrique de tous les points, dont l'ajustement entre les niveaux du régime d'eau et du régime de la productivité du sol, tend à être parfait.

Vu que la présentation schématique du sujet à cet égard se base uniquement sur les données de l'essai de D. SHIMSHI, cet essai ayant été exécuté à Gilath, nous sommes enclins à croire que l'inclinaison de la droite A1 — E5 est caractéristique du sol de Gilath, et qu'à chaque sol correspondra une certaine inclinaison de cette droite.

A chaque point à l'intérieur du rectangle (FGHK) correspond une valeur sur l'échelle (H/P). En acceptant cette valeur comme indice d'irrigation, on va procéder comme suit : la dose d'application d'eau est divisée par l'indice d'irrigation ; la valeur qui résulte représente la somme d'évaporation PICHE accumulée jour par jour. Quand cette somme sera atteinte, c'est la date de la prochaine irrigation.

L'intervalle d'irrigation n'étant pas fixé d'avance, la date d'application d'eau est fonction des conditions climatiques (pouvoir évaporant de l'air).

La dose à appliquer au cours d'une irrigation est fonction du sol d'une manière prépondérante. La limite inférieure envisagée du taux d'humidité du sol est fonction de la culture en question. Jusqu'à présent nous n'avons analysé que les données concernant l'irrigation d'un seul pays, celui d'Israël.

Cependant nous voudrions bien ajouter quelques analyses corncernant l'irrigation de pays dont le climat diffère bien de celui d'Israël, mais nous nous bornerons (pour le moment) à communiquer seulement le résultat d'une seule analyse, celle de l'irrigation au Soudan (Station de Recherches agronomiques Gezira, Wad Medani 14°24′ Lat. Nord, 23°29′ Long. Est ; 505 m alt.).

D'après les indications empruntées au livre de TOTHILL [1] nous avons trouvé que, pour le Cotonnier, le rapport H/P (irrig. + pluie) est de 0,59 à 0,65 et la limite inférieure d'humidité du sol est de 60 p. 100 de la capacité de champ. En reportant ces valeurs sur les diagrammes présentés par nous, on remarquera que le point trouvé pour Gezira, se place exactement à l'endroit où se trouve le point n° 3, trouvé pour le Cotonnier à Shluhoth, dans la dépression de Beth-Shean (latitude 32°29′ N).

Nous tenons à rappeler que tous les points des figures se rapportent à des conditions différentes de climat, de sol et de cultures.

Reçu pour publication en juillet 1962.

[1] Agriculture in the Sudan. Y. D. TOTHILL, 1948, Oxford Univ. Press.

SUMMARY

RATES OF IRRIGATION IN RELATION TO DATA YIELDED BY THE PICHE APPARATUS UNDER SCREEN

Under the climatic conditions prevailing in Israel, (and probably in countries where climate is very different), the optimum rates of irrigation can be estimated from data of evaporation under screen (measured by means of the PICHE evaporimeter).

Analysis of data of a fair number of irrigation experiments led to the establishment of simple and easily recognized relationships between the ratio H/P (H amount of water applied at P evaporation), fertilizer supply to the soil, and soil-moisture level reached before irrigation.

ZUSAMMENFASSUNG

WASSERMENGEN ZUR BEWÄSSERUNG IM VERGLEICH DER AN GESCHÜTZTER STELLE AUFGESTELLTEN PICHE-APPARATES

Die optimalen Wassermengen, die zum Bewässern notwendig sind, können unter dem Klima Israels und wahrscheinlich in Gegenden mit vollkommen verschiedenem klima, durch Evaporation an geschützter Stelle bestimmt werden (gemessen am Evaporometer PICHE).

Durch Auswertung einer gewissen Anzahl von Bewässerungsversuchen kann man die einfachen und bequemen Relationen zwischen H/P (Wassermenge H zur Verdunstung P), dem Düngungsgrad des Bodens und der vor der Bewässerung erreichten Bodenfeuchtigkeit festlegen.

РЕЗЮМЕ

Количества ирригационной влаги по отношению к данным полученным при помощи аппарата Пиша под прикрытием.

Л. А. РЕЙСС.

Оптимальные количества влаги необходимые для ирригации в Израильском климате могут быть определены исходя от испарения под прикрытием (измеренного эвапорометром Пиша).

Разбор некоторого количества опытов ирригации, позволяет вывести простые и удобные реляции между отношением H/P (количество принесенной влаги -H, к испарению -P), степенью удобрения почвы и степенью влажности достигнутой почвой перед ирригацией.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 571-586.

RENDEMENT ET ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE DANS UNE OASIS DU BAS-SAHARA. (EL-ARFIANE OASIS)

M. GIRARD et Ch. BALDY

avec la collaboration technique de MM. LAMINE et ABD-EL-KADER

Services agricoles, El-Arfiane ;
Centre de Recherches agronomiques d'Algérie, Alger

SOMMAIRE

Un dispositif expérimental a été mis en place à El-Arfiane pour étudier certains aspects du climat de l'oasis, notamment au point de vue du bilan hydrique. Ces données climatiques peuvent expliquer des modifications locales de rendement.

I. — PRÉSENTATION DE L'OASIS D'EL-ARFIANE

1. 1. *Situation de l'oasis*

La Station expérimentale d'El-Arfiane est située au centre de la région naturelle de l'Oued Rhir, à 60 km au nord de Touggourt, sur le 33e parallèle nord. L'ensemble des palmeraies formant l'oasis représente 140 ha d'un seul tenant. Le plan d'ensemble est donné fig. 1. La région ne présente pratiquement pas de relief.

Les sols sont sableux (80 p. 100 de sables), sans structure, riches en sels solubles, avec un plan d'eau à 0,80 m en hiver et 1,20 m en été. (Une étude des conditions de croissance du palmier dans l'oasis est préparée par M. GIRARD).

Les eaux d'irrigation sont fournies par un forage peu profond qui débite une eau à forte salinité : 6,8 g. l^{-1} d'extrait sec à 180°C. Cette eau a des rapports Na)(Ca + Mg) assez bon et Cl/SO_4 voisin de 1, ce qui contribue à la rendre acceptable par un assez grand nombre de cultures, le sol permettant un drainage satisfaisant. Ce puits avait un débit correspondant à 50 l. $mn^{-1}.ha^{-1}$ jusqu'en 1960, puis il a décru jusqu'à 20 l. mn^{-1}. ha^{-1}, nettement insuffisant en été, d'où la disparition des drainages durant

cette saison. Les irrigations n'ont été données que tous les 18 j au lieu de 7, à 700 m^3. ha^{-1} en été ; en hiver, la fréquence a été augmentée mais à 280 m^3. ha^{-1} seulement. Ceci a eu pour conséquence un enrichissement des sols en sels. Les eaux de drainage ont

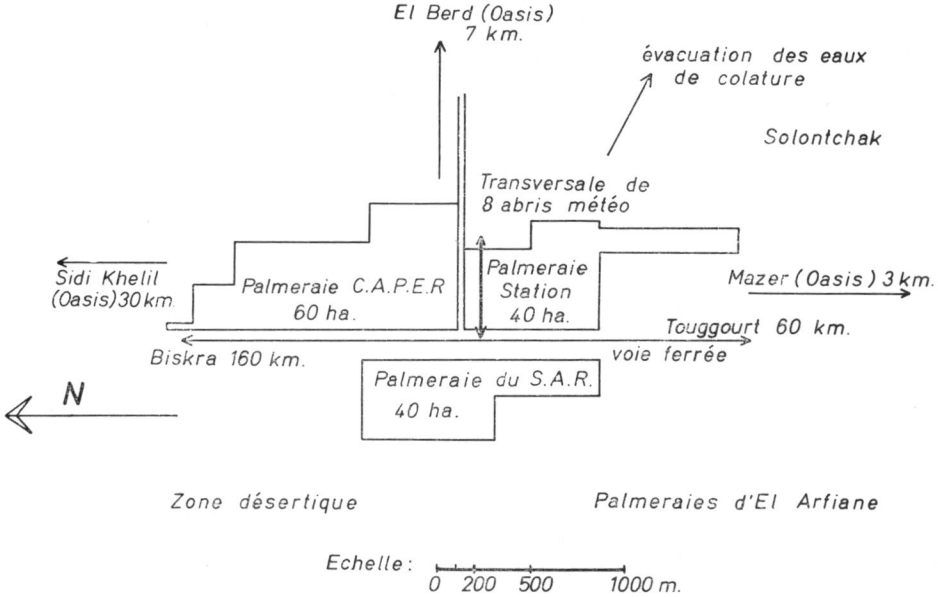


FIG. 1. — *Plan d'ensemble des palmeraies*

des teneurs de 12 à 14 g. l^{-1} avec enrichissement relatif en sodium. Les drains (photo 3, premier plan à droite), creusés tous les 2 ou 3 rangs d'arbres selon les endroits, débouchent dans des drains principaux profonds de 1,50 m (dans l'axe de la photo). L'irrigation est donnée en larges planches plates à faible pente pour éviter les accumulations en bout de parcelle (photo 4).

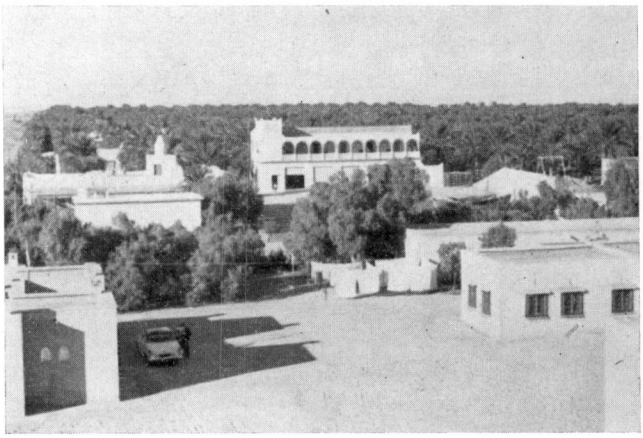


PHOTO 1. — *Vue générale des palmeraies vers le nord*

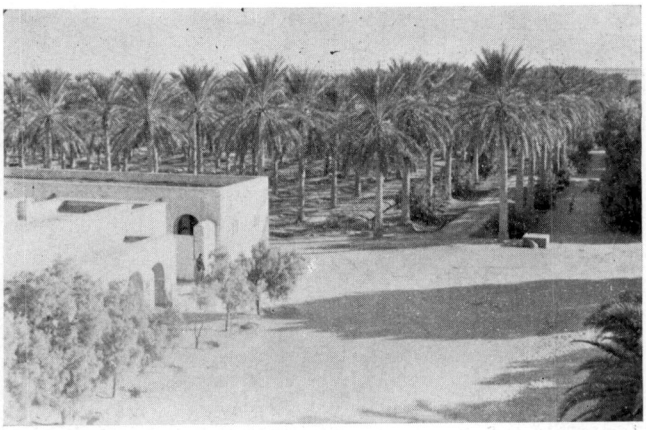


PHOTO 2. — *Parcelle P. R.* var. Deglet Nour. *Au premier plan, devant les bureaux,* Tamarix articulata. *Vue vers le Sud.*

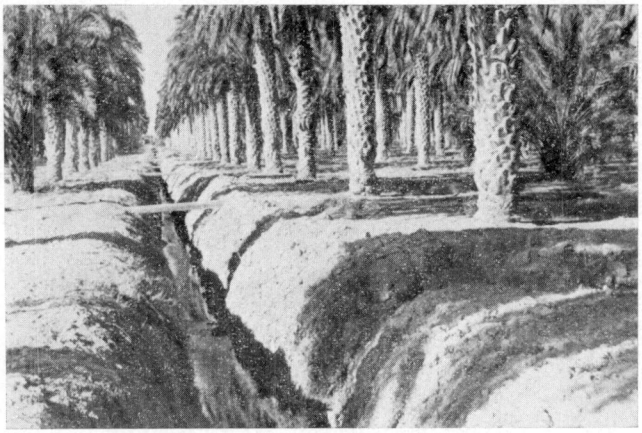


PHOTO 3. — *Drain collecteur recevant l'eau des drains primaires venant de droite* (1er *plan notamment*). *Variété* Degla Beida

PHOTO 4. — *Dans la parcelle P. R,* Deglet Nour *de* 40 *ans*

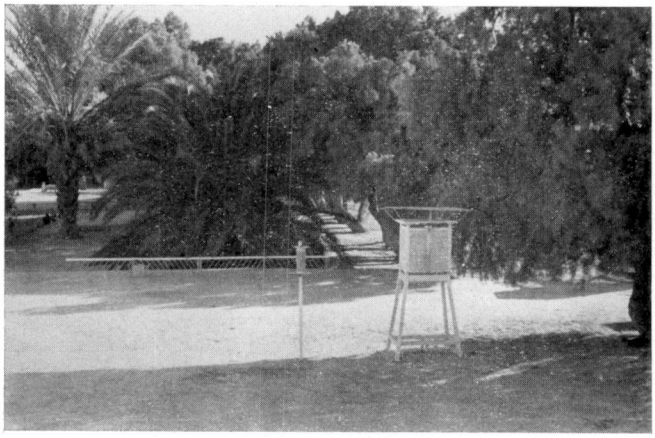


PHOTO 5. — *Abri météorologique principal et abri simplifié.*
Derrière : Phenix Canariensis, Tamarix articulata. Deglet Nour *à l'extrême gauche*

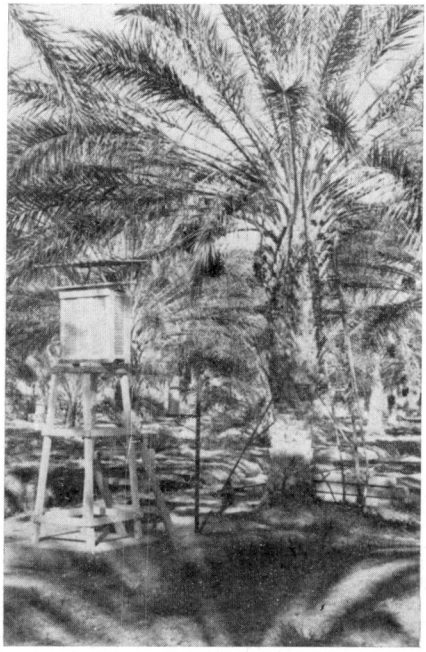


PHOTO 6. — *Abri dans la palmeraie Esparbès et abri simplifié.*
Échelle permettant la lecture de l'abri simplifié au cœur du palmier

PHOTO 7. — *Abri simplifié à la bordure ouest de la palmeraie dans le jardin potager sous la parcelle Esparbès. A droite un palmier, un casuarina ; à gauche, cyprès, géranium et Stenotaphrum autour*

PHOTO 8. — *Brise-vent, abri d'Eucalyptus*

Des rangées de brise-vent entourent la Station, prolongée au Nord par une palmeraie (photo 1). Trois variétés de dattiers sont cultivées : *Deglet Nour, Degla Beida et Ghars.*

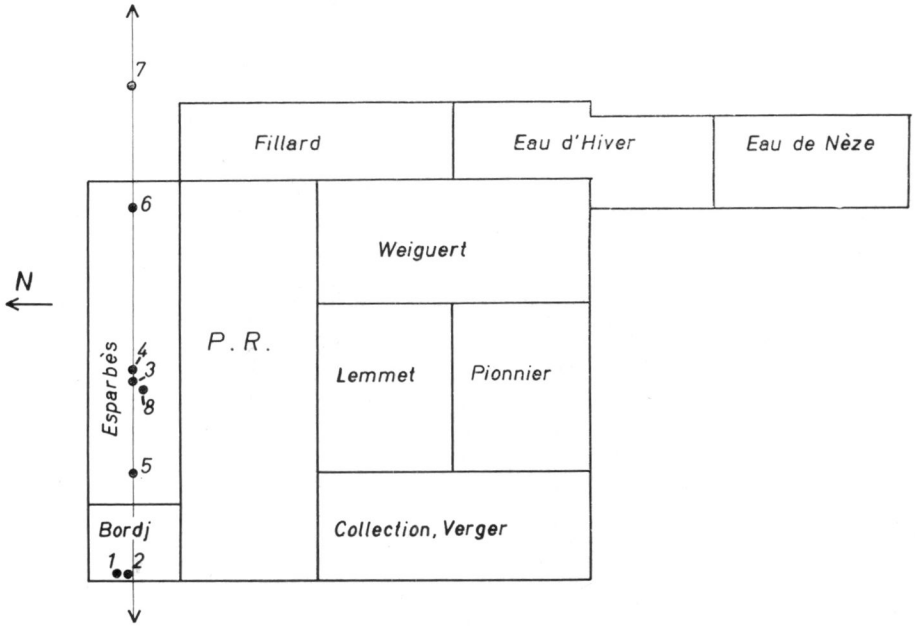


FIG. 2. — *Détail des parcelles expérimentales*

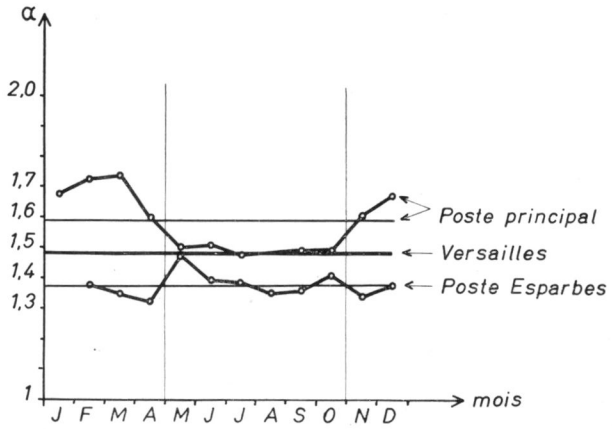


FIG. 3. — *Variation mensuelle des rapports entre abri simplifié et abri anglais au poste principal et au poste Esparbès comparés à la valeur trouvée à Versailles*

1. 2. *Postes météorologiques*

Un abri anglais complet (n° 2) existait depuis longtemps à l'Ouest de l'oasis, près du bordj. Le plan 2 détaille les emplacements des huit abris installés à travers l'oasis en 1962. Les photos 5, 6 et 7 présentent plusieurs de ceux-ci. Les appareils ont été soigneusement relevés chaque jour.

Les corrélations entre les évaporations mesurées au Piche sous abri anglais et sous abri simplifié sont données mois par mois au graphique 3. Les valeurs systématiquement plus faibles relevées dans la parcelle Esparbès (sauf en mai ou les vents ont été particulièrement violents) peuvent venir du manque d'aération et de la différence de niveau entre les deux postes ; la variation saisonnière observée au

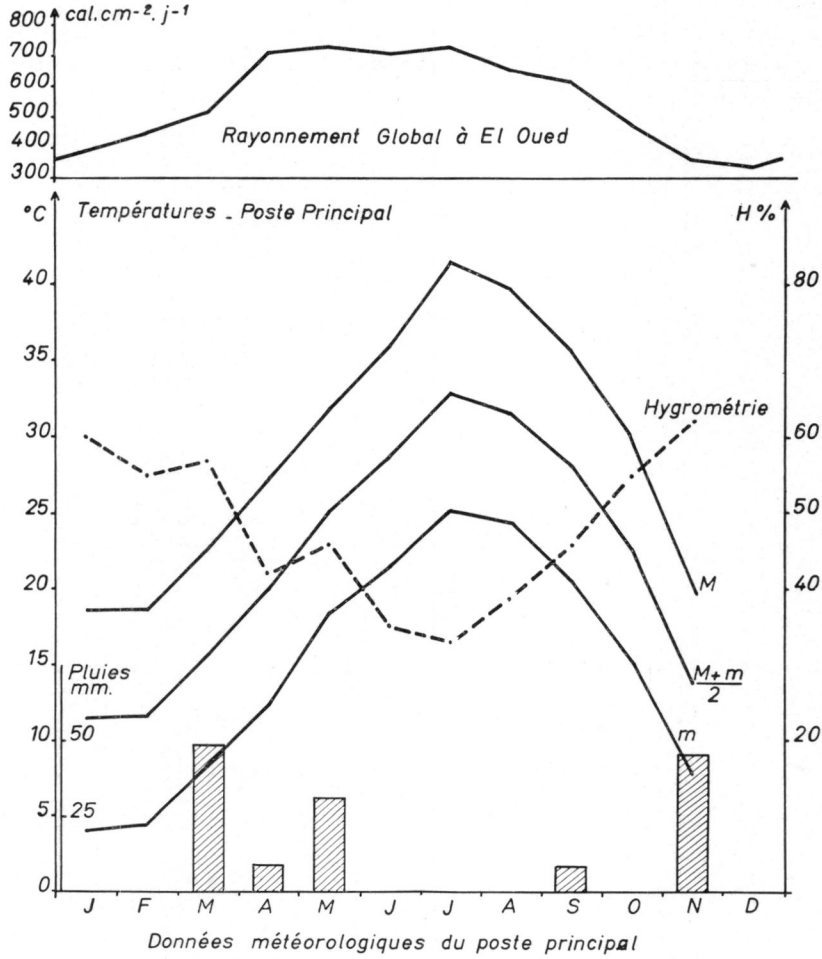


FIG. 4. — *Moyennes climatiques pour El-Arfiane en 1962 (El-Oued est à 60 km au NE d'El-Arfiane)*

poste principal peut être due à la variation des vents dominants ; d'Ouest en hiver, ils donnent une forte ventilation ; d'Est en été, ils sont alors coupés par la barrière de l'oasis (EYRAUD, 1960). Le coefficient est le même en été à Versailles et dans le poste principal d'El-Arfiane.

Les formules utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) sont celles de BOUCHET, Piche corrigé, (1960), THORNTHWAITE (1948) et TURC (1961).

1. 3. *Données climatiques*

Les vents du quart-Est prédominent en hiver, ceux du quart-Sud-ouest en été. On ne note pas de brise diurne définie.

Le graphique 4 groupe les données de températures mensuelles, d'hygrométrie et de pluviométrie pour El-Arfiane et de rayonnement global pour El-Oued. On signale des rosées en hiver.

La pluviométrie en 1962, 141 mm, est supérieure à la moyenne (82 mm). Elle varie selon les années de 9 à 170 mm ; les précipitations automnales sont relativement les plus régulières.

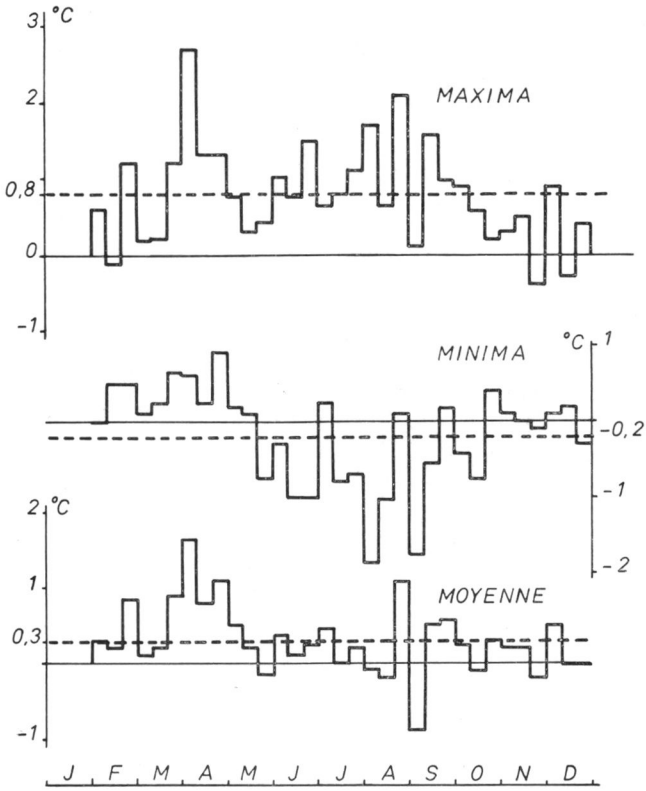


FIG. 5. — *Différences de températures Poste Esparbès — Poste principal. Températures maximales, minimales et moyennes en moyenne décadaire*

Le graphique 5 montre les écarts de température entre l'extérieur et l'intérieur de l'oasis. La moyenne des maximums à l'intérieur de la parcelle Esparbès excède de 0°8 celle du poste principal. Cet écart significatif disparaît en hiver et une faible inversion peut même se produire. Les minimums un peu plus élevés dans l'oasis en hiver, sont nettement plus faibles en été. On ne peut expliquer cet écart par la différence de hauteur des deux postes : SELTZER (1935) a montré que le gradient thermique dans un couvert forestier est très faible et le poste Esparbès, placé plus haut, devrait avoir des maximums moins élevés que le poste principal. Tout se passe comme si,

en été, l'oasis avait un indice de continentalité plus grand que le désert et comme s'il y avait advection de chaleur.

II. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE DANS L'OASIS

2. 1. *A l'échelle géographique.*

On peut calculer ETP à l'aide de diverses formules classiques et comparer les valeurs trouvées. C'est ce que nous présentons au graphique 6 où les formules du Piche corrigé (BOUCHET), de TURC et de THORNTHWAITE pour El Arfiane, et de TURC et du Piche corrigé pour Maison-Carrée sont comparées. Les valeurs annuelles sont les suivantes :

	El-Arfiane	Maison Carrée
	—	—
THORNTHWAITE	1 209 mm	—
TURC	1 876	1 133
Piche corrigé (BOUCHET)		1 139
Potager	1 563	
Poste	1 841	

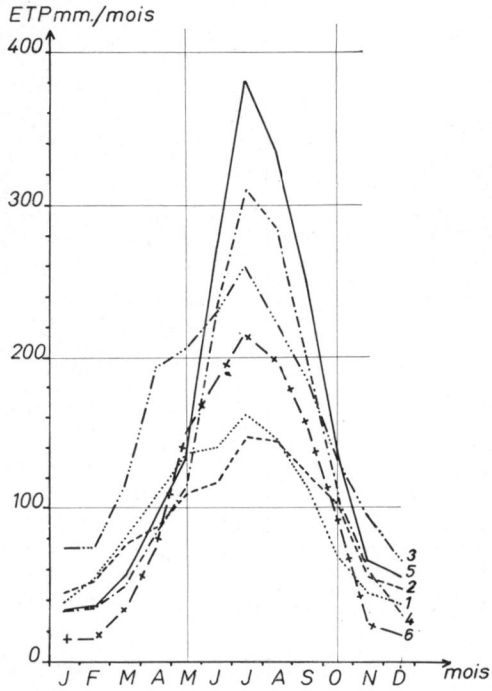


FIG. 6

1. — Maison Carrée Formule de TURC
2. — Maison Carrée Formule du Piche corrigé
3. — El Arfiane Formule de TURC
4. — El Arfiane Formule du Piche corrigé pour le jardin
5. — El Arfiane Formule du Piche corrigé au Poste principal
6. — El Arfiane Formule de THORNTHWAITE

Or, les pluies et les irrigations ont apporté sur l'ensemble de l'oasis (à l'exception du potager) 1 700 mm dans l'année. En hiver, 40 p. 100 de l'eau environ part en drainages. En été, du fait de la baisse de débit du forage, toute l'eau a été absorbée par les arbres, ce qui a limité le déficit mais accentué la salinité du sol. Le potager, plus arrosé, a eu des drainages estivaux.

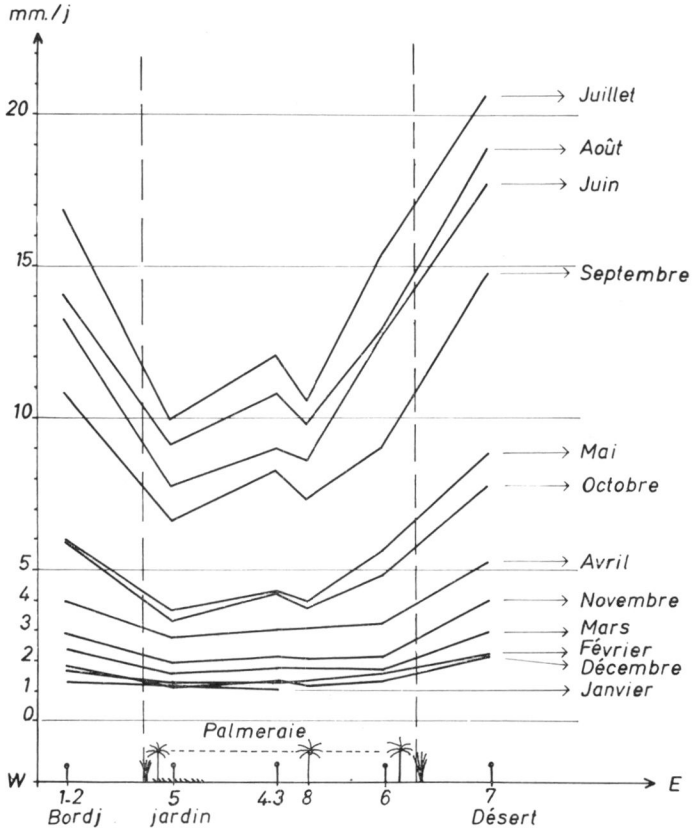


FIG. 7. — *Évapotranspirations potentielles calculées par la méthode du Piche corrigé sur une ligne de 8 postes à travers la parcelle Esparbès*

Les emplacements des postes sont schématisés au bas de la figure.
1. — Poste simplifié près de l'abri principal
2. — Abri principal
3. — Abri d'Esparbès
4. — Poste simplifié à côté de l'abri
5. — Poste simplifié dans le jardin potager
6. — Poste simplifié à l'Est de la palmeraie
7. — Poste simplifié à 50 m à l'Est dans le désert
8. — Poste simplifié au cœur d'un palmier à côté de l'abri Esparbès.

Si les valeurs annuelles du Piche corrigé (BOUCHET) et de TURC sont très cohérentes et rejoignent remarquablement les apports réels, les valeurs mensuelles présentent des désaccords importants. La formule de TURC, basée sur le rayonnement global et la température moyenne (et affectée en été d'une correction pour tenir compte des déficits de saturation importants) donne des valeurs nettement plus fortes en hiver et plus faibles en été que celle du Piche corrigé.

Quant aux valeurs données par THORNTHWAITE, elles sont inférieures à celles fournies par les autres méthodes. L'absence d'un facteur correctif tenant compte de l'aridité du lieu en est certainement cause ; il est reconnu en outre qu'elles sous-estiment systématiquement l'ETP par rapport à d'autres formules du même type (comme celle de BLANEY et CRIDDLE par exemple). Remarquons que les valeurs d'ETP citées par DAMAGNEZ pour l'oasis de Ksar-Rhilane sont voisines, à moins de 15 p. 100 près, de celles calculées dans l'oasis d'El-Arfiane par les formules TURC et du Piche corrigé. L'évaporomètre de Piche permet donc d'avoir une idée du gradient du pouvoir évaporant de l'air au sein de l'oasis.

Malgré les conditions particulières, les formules fournissent des résultats équivalents à ceux qu'on obtient ailleurs en climat semblable.

2. 2. *A l'échelle microclimatique.*

Le réseau de postes installé sur une transversale dans l'oasis a permis de tracer le graphique 7.

Installé en janvier-février 1962, les mesures ont été faites régulièrement et ont permis de connaître les variations du pouvoir évaporant de l'air dans les différentes positions indiquées fig. 2. Nous les avons schématisés au bas du graphique 7 qui présente mois par mois l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule du Piche corrigé, avec les coefficients établis par BOUCHET en 1960.

Étant donné l'aridité de la région et l'intensité des phénomènes convectifs au voisinage de l'oasis, il est logique de penser que les valeurs évaporométriques calculées pour les postes du désert sont surévaluées.

Le psychromètre qui a servi à calculer le point de rosée est installé dans le poste principal dont nous avons vu les conditions plus normales d'aération.

L'étude des profils d'ETP à travers l'oasis indique un minimum très net durant l'été au niveau du jardin potager [1] dans lequel un couvert herbacé à plusieurs étages (photo 7) évite la formation d'une croûte de sol sec en surface. L'abri n° 8, au cœur d'un palmier, sur sol nu, accuse le même minimum.

La réduction de l'ETP de la région à mesure que la surface irriguée est plus grande par rapport à la zone aride environnante, conséquence de l'effet d'oasis, est nulle ou peu marquée de novembre à avril (rapport de 1 au centre de l'oasis à 1,5 dans le désert). Elle devient plus importante en été (rapport de 1 à 2).

On retrouve ici le rapport indiqué dans l'étude théorique de R. J. BOUCHET (1963) : l'évapotranspiration potentielle varierait du centre à la limite de l'oasis de ETP_0 (valeur correspondant à un couvert végétal étendu, uniforme et évaporant au maximum) à 2 ETP_0.

III. — RENDEMENT DES PALMIERS

3. 1. *Présentation des résultats*

Étant donnée la régularité assez grande des irrigations dans l'oasis on peut se demander si la production des arbres a la même régularité. Nous avons étudié les rendements de deux parcelles situées côte à côte, P.R. et Esparbès (cf. fig. 2).

[1] Le potager est lui-même protégé par une haie de thuyas.

En ce qui concerne P.R., nous avons calculé les rendements moyens par arbre pour les variétés *Degla Beida et Deglet Nour* sur 10 ans (1951-1960). Cette parcelle, plantée en 1922, se trouve bordée à l'Ouest par un épais brise-vent, à l'Est par une jeune parcelle plantée en 1952 (Fillard) qui joue un rôle de brise-vent supplémentaire, sans nuire à l'insolation matinale.

Quant à Esparbès, située au Nord de la précédente, elle a été plantée en *Deglet Nour* en 1938. Nous avons retenu les rendements moyens de 1959 à 1962.

Nous donnons dans le tableau ci-dessous les moyennes calculées par arbre pour 12 rangs de P.R. et 12 rangs d'Esparbès, d'Ouest en Est. Sous les 12 premiers rangs d'Esparbès à l'ouest se trouve le potager de la station.

TABLEAU I

Rendement moyen (en kg) d'un arbre suivant sa position géographique dans la palmeraie

	Parcelle	Nord				Variétés	
Ouest	Esparbès	—	87,0 (1)	60,5	52,0	(Deglet-Nour)	Est
	P. R.	61,3	68,6	74,7	98,0	(Deglet-Nour)	
		70,4	96,9	98,3	98,9	(Degla-Beida)	
	N° des rangs	1 11	22	33	44		

(1) Jardin potager

Le graphique 8 présente, rang par rang, le rendement pour la variété *Deglet Nour* de la parcelle P.R. On voit que le premier rang est très supérieur aux suivants. La ligne verticale tracée de part et d'autre de la moyenne indique la variabilité maximale pour chaque rang.

Ce résultat est moins net pour la variété *Degla Beida,* dont les rendements moyens sont généralement plus importants et qui « saisonne » plus que *Deglet Nour,* mais la variation est dans le même sens.

Remarquons que le dattier atteint l'âge adulte vers 40 ans et qu'Esparbès n'a que 20 ans alors que P.R. en a 40 environ ; il est logique de trouver des rendements plus faibles sur Esparbès que sur P.R.

3. 2. *Analyse des résultats*

Les résultats d'Esparbès montrent que les rendements sur jardin potager sont nettement plus élevés. L'irrigation plus abondante (de l'ordre de 50 p. 100 d'eau en plus durant l'été) et l'ETP calculée plus faible (cf. fig. 7) ont permis à l'ensemble de l'association d'avoir ses besoins satisfaits pendant une grande partie de l'année : les apports nets (irrigation moins drainage) ont atteint 70 à 80 p. 100 de l'ETP calculée en juillet.

Les rendements (87 kg par arbre) sont supérieurs de près de 50 p. 100 à ceux de la bordure Est (52) et voisins de ceux de la bordure Est de P. R. (98), Mais, compte

tenu de l'âge des arbres, les rendements de l'Est d'Esparbès [1] sont eux-mêmes sensiblement équivalents à ceux de l'Est de P.R. En outre, le pourcentage de dattes des premières qualités est nettement supérieur sur le jardin et en bordure Est qu'au centre de la parcelle.

Par rapport au potager, l'ETP calculée est plus élevée sur sol nu, au centre (rapport de 1 à 1,2) et surtout à l'Est (rapport de 1 à 1,5 en juillet) dans la parcelle d'Esparbès.

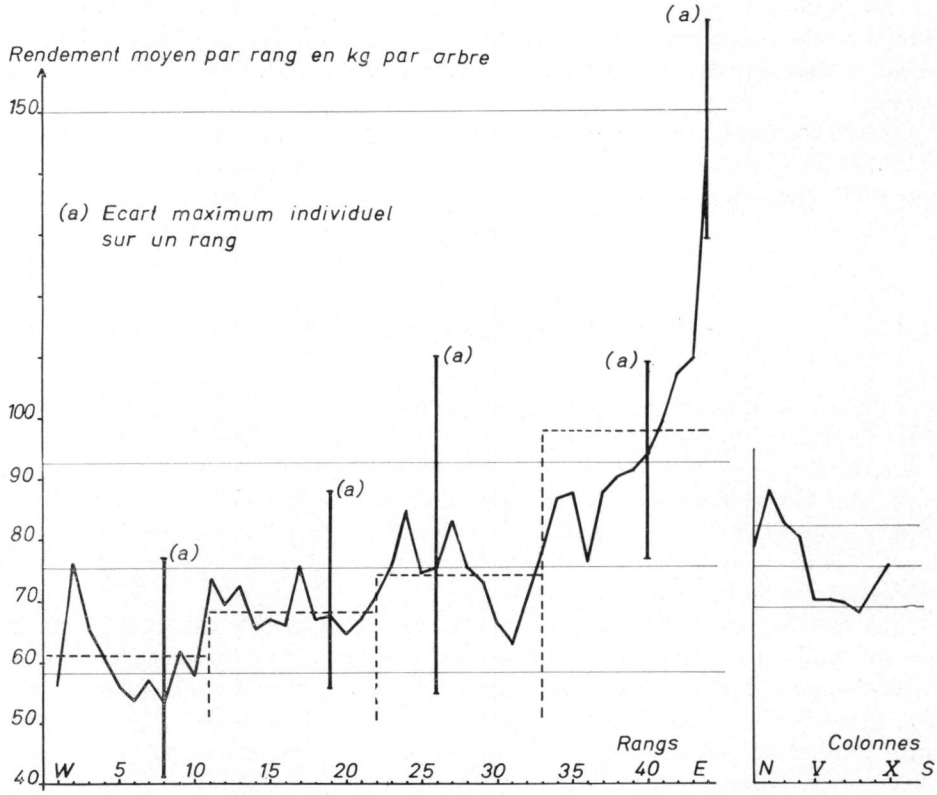


FIG. 8. — *Rendement des* 44 *rangs (est-ouest) et des* 10 *colonnes (nord-sud) de Palmiers* Deglet-Nour *(Parcelle (P.R,).*
Valeurs moyennes du rendement par blocs de 110 *arbres (est-ouest) en pointillé.*
Les ordonnées tracées en trait fin représentent la p.p.d.s. (5%) pour l'ensemble de la parcelle (± 17kg) par rapport à la moyenne (75kg)

Considérons à présent les rendements de la parcelle P.R. La quantité d'eau d'irrigation y est inférieure à celle du jardin. Le tableau 1 et le graphique 8 montrent que le palmier a une productivité améliorée à l'Est par rapport au centre et à l'Ouest. Ceci amène à penser qu'un facteur autre que l'irrigation ou l'ETP a dû jouer. La seule explication (corroborée par d'autres observations faites tant au Sahara que dans des palmeraies aux U. S. A.) semble être le complexe héliothermique : les arbres situés à l'Est profitent au mieux des premiers rayons du soleil, au moment où la température plus clémente et l'état hygrométrique plus élevé permettent l'ouverture

[1] L'encroûtement gypseux à l'est est également une cause de baisse de rendements.

des stomates et favorisent ainsi la photosynthèse. Précisons d'ailleurs que le nombre de fruits varie peu mais que les meilleures conditions de croissance se manifestent sur la grosseur et la qualité : le rendement *qualitatif* est donc plus amélioré que le rendement *quantitatif* (lui-même fortement augmenté).

Dans le cas du jardin potager (où l'influence des fumures organiques et l'enfouissement des débris doivent jouer aussi) comme dans celui de la bordure Est, l'amélioration de la qualité des dattes paraît être liée aux possibilités de photosynthèse (1).

La salinité excessive des sols ces dernières années a joué dans le sens d'une réduction à la fois du poids et de la qualité des dattes : les disponibilités instantanées en eau se sont trouvé limitées par une pression osmotique plus élevée de la solution du sol.

Soulignons enfin qu'à l'opposé de la pratique actuelle, il faudrait augmenter les quantités d'eau en bordure de l'oasis pour contrebalancer l'évapotranspiration potentielle plus intense.

IV. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Malgré des moyens très limités, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de faits intéressants pour l'étude du climat des oasis ; les températures maximales et minimales dans l'oasis sont nettement différentes de celles du désert, de façon variable selon les saisons. On peut avoir des écarts supérieurs à deux degrés en moyenne décadaire entre l'oasis et le désert. Une importante réduction du vent dans l'oasis et un effet de brise-vent à son voisinage modifient de façon importante les coefficients de ventilation des abris.

La transversale Est-Ouest à travers la parcelle Esparbès fait ressortir un important gradient d'évaporation entre le désert et les parties les mieux arrosées de la palmeraie. Ce gradient ne peut s'expliquer que par un effet d'oasis important. Celui-ci est beaucoup plus net durant le trimestre estival qu'en hiver. Le bon accord entre le résultat global des formules basées sur le rayonnement global et sur le Piche corrigé laisse penser que les valeurs trouvées se rapprochent assez de l'évapotranspiration potentielle de l'oasis.

La réduction de l'ETP par l'association jardin-sous-palmeraie est nettement bénéfique. Il en va de même pour l'emplacement des arbres dans la palmeraie par rapport au soleil : l'exposition d'Est permet à la plante de synthétiser activement aux premières heures de la matinée. D'autres facteurs peuvent cependant expliquer aussi l'amélioration du rendement : structure du sol, drains plus rapprochés.

Ces premiers résultats montrent tout l'intérêt qu'il y a à connaître, non seulement les quantités d'eau d'irrigation consommées dans une oasis, mais aussi l'ETP dans celle-ci et son évolution dans l'espace. Ceci nous encourage à poursuivre dans cette voie et à étudier à l'avenir les gradients thermiques dans l'oasis et à faire des mesures directes de bilan hydrique.

Reçu pour publication en avril 1963

(1) Dans les palmiers à 4,50 × 9 m, le rendement décroît régulièrement à partir de la 20e année faute d'un éclairement suffisant.

SUMMARY

Yields and potential evapotranspiration in an oasis of the lower Sahara

In spite of the very limited means, certain interesting facts for the study of climate in an oasis were arrived at. Maximum and minimum temperatures in an oasis are quite different from those in the desert, varying according to season ; differences greater than two degrees, on ten-days averages, may occur between oasis and desert. The great reduction of wind in the oasis and the shelter effect of its environment substantially modify the coefficients of ventilation of the canopies.

In east-west direction across the Esparbès plot, there is a substantial evaporation gradient between the desert and the well irrigated palm plantation, due to a marked oasis effect. The good correlation between results using formulae based on global radiation and on corrected Piche suggests that the values obtained approach the potential evapotranspiration in the oasis.

The reduction of potential evapotranspiration by the garden associated with the palms is most beneficial. The same applies for the position of palms in relation to the sun : exposure towards the east permits an active synthesis in the plant during the first few hours of the morning. Other factors affecting the improvement in yields may be the structure of soil and a denser drainage system.

These preliminary results show the importance, in addition to the amounts of irrigation water, of establishing the potential evapotranspiration and its changes in space in an oasis. In continuation of this investigation, thermal gradients in the oasis are to be studied and direct measurements of the hydraulic balance are to be made in the future.

ZUSAMMENFASSUNG

Ertrag und potentielle Evapotranspiration in einer Oase der niederen Sahara

Trotz beschränkter Mittel konnten wir eine Anzahl interessanter Tatsachen für das Studium des Oasenklimas herausstellen ; die maximalen und minimalen Temperaturen sind grundverschieden von denen der Wüste, und ändern sich mit den Jahreszeiten. Im Mittel erhält man Abweichungen von über zwei Grad pro Dekade zwischen Wüste und Oase. Eine starke Verringerung des Windes in der Oase und die Wirkung des Windschutzes verändern in hohem Masse die Ventilationskoeffizienten der geschützten Stellen.

Die ost-westliche Querlinie durch die Parzelle Esparbès stellt einen wichtigen Verdunstungsgradienten zwischen der Wüste und den best bewässerten Teilen des Palmenhaines heraus, der sich nur durch einen wichtigen Oaseneffekt erklären lässt. Die gute Übereinstimmung zwischen dem Globalresultat der auf Globalstrahlung basierten Formeln und dem verbesserten Piche gestattet die Annahme, dass die gefundenen Werte sich ziemlich der potentiellen Evapotranspiration der Oase nähern.

Die Verringerung dieser potentiellen Evapotranspiration durch Assoziation Garten unter Palmenhain ist äusserts nutzbringend. Das gleiche gilt für den Stand der Bäume in dem Palmenhain zur Sonne : in östlicher Lage synthetisiert die Pflanze in den frühen Morgenstunden besonders aktiv. Andere Faktoren erklären ebenfalls die Ertragsverbesserung : Bodenstruktur, näher liegende Drains usw.

Diese ersten Resultate zeigen das Interesse, nicht nur die Mengen des dargeboten Irrigationswassers in einer Oase zu kennen, sondern auch die pot. Evapotranspiration derselben und ihre räumliche Entwicklung. Dies spornt uns zu neuen Studien in dieser Richtung mit den thermischen Gradienten in der Oase und direkten Messungen der Wasserbilanz an.

РЕЗЮМЕ

Урожайность и потенциальная эвапотранспирация в оазисе нижней сахары в 1962.

М. ЖИРАР и К. БАЛЬДИ.

Несмотря на весьма ограниченные средства, авторам удалось выявить несколько фактов представляющих интерес для изучения климата оазисов; максимальные и минимальные температуры оазиса резко отличаются от температур пустыни, но, в различной степени, в зависимости от времени года. Возможны различия в средней десятидневной температуре междду

оазисами и пустыней, превышающие два градуса. Уменьшение силы ветра в оазисе и ветроломный эффект по соседству с ним в сильной степени изменяют коэффициенты вентиляции прикрытий.

Поперечная Восток — Запад проведенная через делянку Эспарбеса указывает на существование крупного градиента испарения между пустыней и наиболее орошенными частями пальмовых рощ. Градиент этот об'ясняется только сильным эффектом оазиса. Согласованность между общим результатом достигнутым при применении формул основанных на общем излучении и на исправленной формуле Пиша, позволяют думать, что найденные величины приближаются к потенциальной эвапотранспирации оазиса.

Редукция ETP при помощи растительных сообществ (сады под пальмами), оказывает благотворное действие. Тоже самое наблюдается в смысле расположения деревьев в пальмовой роще по отношению к солнцу : экспозиция на Восток улучшает синтетическую активность растений в ранние утренние часы. Однако, увеличение урожайности может быть вызвано и другими факторами : почвенной структурой, дренажем проведенным поблизости.

Эти первые результаты показывают всю важность выяснения не только количеств влаги необходимых оазису, но также и его потенциальной эвапотранспирации и ее эволюции с теченцем времени.

Все вышеизложенное заставляет авторов думать что работу по изучению термических градиентов в оазисе и по прямому измерению баланса влаги, следует продолжать и в будущем.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1960. Évapotranspiration potentielle et évaporation sous abri. 6e *Journées de l'Hydraulique, Nancy.*

EYRAUD R., 1960. Note préliminaire sur les mesures psychrométriques. *Notes de l'Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques,* nº 60. Météorologie Nationale, Paris.

GIRARD M., 1962. Observations sur la productivité de trois variétés de palmiers dattiers à la Station expérimentale d'El Arfiane (ronéotypé).

SELTZER P., 1935. Études micrométéorologiques en Alsace Thèse à la Faculté des Sciences de Strasbourg.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.,* **12**, 13-50,

THORNTHWAITE C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.,* **38**. 55-94.

ADDENDUM

Référence se rapportant aux Annales agronomiques, nºs 4 et 5, 1963

BOUCHET R. J., 1963 Évapotranspiration réelle. Évapotranspiration potentielle et production agricole *Ann. agron.,* **14** (5).

Ann. agron., 1963, **14** (4), 587-600.

ÉVAPORATION DE L'EAU DU SOL

A. VERNET

Laboratoire d'Écologie et de Physiologie végétale,
Institut national agronomique, Paris

SOMMAIRE

L'évaporation d'un sol nu peut être reliée de façon simple à l'évapotranspiration potentielle exprimée à partir de l'évaporation sous abri.

INTRODUCTION

Dans l'évapotranspiration (ET), se combinent deux facteurs difficilement dissociables : l'évaporation (E) qui intervient seule quand le sol est nu et la transpiration végétale (T) qui intervient de façon prédominante quand le terrain est complètement couvert par la végétation.

La transpiration végétale est communément considérée comme un mal nécessaire. Il n'en est pas de même de l'évaporation qui entraîne une perte de quelques milliers de mètres cubes d'eau par hectare et par an et dont on cherche depuis toujours à réduire l'importance.

Récemment, BOUCHET ayant présenté sa théorie du Piche corrigé et HALLAIRE sa théorie sur la migration de l'eau dans le sol, il a semblé intéressant de fouiller dans les archives et de revoir, sous un jour nouveau, des recherches sur l'évaporation faites en 1943-44-45.

Les résultats obtenus sur terre de culture à Montpellier (Station de Bioclimatologie de Bel-Air) ont été publiés en 1945 (nous ignorions à l'époque l'étude de PENMAN de 1941). Ces études ont été poursuivies dans la même station par DAMAGNEZ. Nous les avons reprises à Tunis sur des terres de diverses natures, en cases lysimétriques.

MÉTHODES

On procède comme pour l'étude de la transpiration par pesée d'*organe détaché*. Un cylindre de tôle polie est enfoncé verticalement dans le sol. Le diamètre doit être suffisant (10 cm) pour que la résultante des forces de frottement (terre sur tôle) n'exerce sur l'échantillon de terre qu'une

pression inférieure à la résistance du sol à l'écrasement. Une fois le cylindre enfoncé au ras du sol, la surface de l'échantillon doit avoir conservé son niveau et sa structure primitive. Le cylindre est enlevé, fermé à la partie inférieure, pesé et réexposé à l'évaporation dans sa position primitive. Il est par la suite périodiquement pesé.

Les prélèvements sont faits le plus tôt possible après la pluie, tous les deux jours, puis tous les quatre jours en moyenne, pour un cylindre de 13 cm de hauteur. Cette fréquence suffit en général pour tenir compte de la remontée capillaire empêchée par le fond. En principe les échantillons les plus anciens sont renouvelés quand leur évaporation devient inférieure à celle des échantillons plus récents. Les principales causses d'erreur sont les suivantes : erreur incontrôlable au moment des pluies en raison du ruissellement ; modification des échanges thermiques par le métal et l'opération de la pesée, introduisant une erreur systématique ; influence de la microtopographie au voisinage de l'échantillon. Cette cause d'erreur aléatoire l'emporte sur la précédente dont l'effet n'a pas pu être mis en évidence au cours d'expériences avec des pots de différentes natures et dimensions.

I. — ÉVAPORATION RÉELLE A LA SURFACE D'UN SOL ARGILO-CALCAIRE EN JACHÈRE NUE

1°) ÉVAPORATION DU SOL ET ÉVAPORATION SOUS ABRI MÉTÉOROLOGIQUE

Les mesures ont été réalisées à Montpellier au cours des quatre périodes :

29 février — 30 mars 1944
22 mai — 22 juin 1944
11 juillet — 4 août 1944
29 janvier — 24 avril 1945

Dans tous les cas, le sol se trouvait ramené au départ à la saturation ou au voisinage de la saturation. La figure 1 A représente la variation de l'évaporation cumulée en fonction du temps.

Si, dans le but d'exprimer les pertes en eau du sol en fonction des données climatiques, on porte graphiquement (fig. 1 B) l'évaporation cumulée du sol E en fonction des valeurs cumulées de l'évaporation sous abri P_0 (mesurée sur évapomètre Piche), les points correspondants à chacune des périodes considérées s'alignent très régulièrement sur une courbe d'ajustement.

On remarque toutefois que les courbes ainsi obtenues diffèrent de façon très significative selon qu'il s'agit de la période hivernale ou estivale ; à la même évaporation sous abri correspond une évaporation du sol plus élevée en été qu'en hiver. Ceci laisse penser que le rapport entre l'évapotranspiration potentielle et la valeur du Piche varie avec la saison. Or, on sait qu'une étude théorique de R. J. BOUCHET a précisément montré que l'évapotranspiration potentielle pouvait être exprimée à partir de l'évaporation sous abri P_0, mais à condition de multiplier cette grandeur par un terme $[1 + \lambda(\theta)]$ fonction croissante de la température.

Soit
$$P = P_0 [1 + \lambda(\theta)]$$

P est la valeur corrigée de l'évaporation sous abri.(cf. BOUCHET, 1968)

Représentons alors les évaporations cumulées du sol E en fonction de cette quantité P (fig. 1 C). Les courbes se superposent. Il y a bien entre les pertes en eau du sol et les évapotranspirations potentielles cumulées (proportionnelles à P) une relation unique et simple

Les petites pluies (inférieures à 3,7 mm sur les courbes de la fig. 1) n'ont qu'une influence passagère et ne retardent pas en fin de compte le desséchement du sol.

La courbe d'ajustement présente deux parties. *La première partie de la courbe*

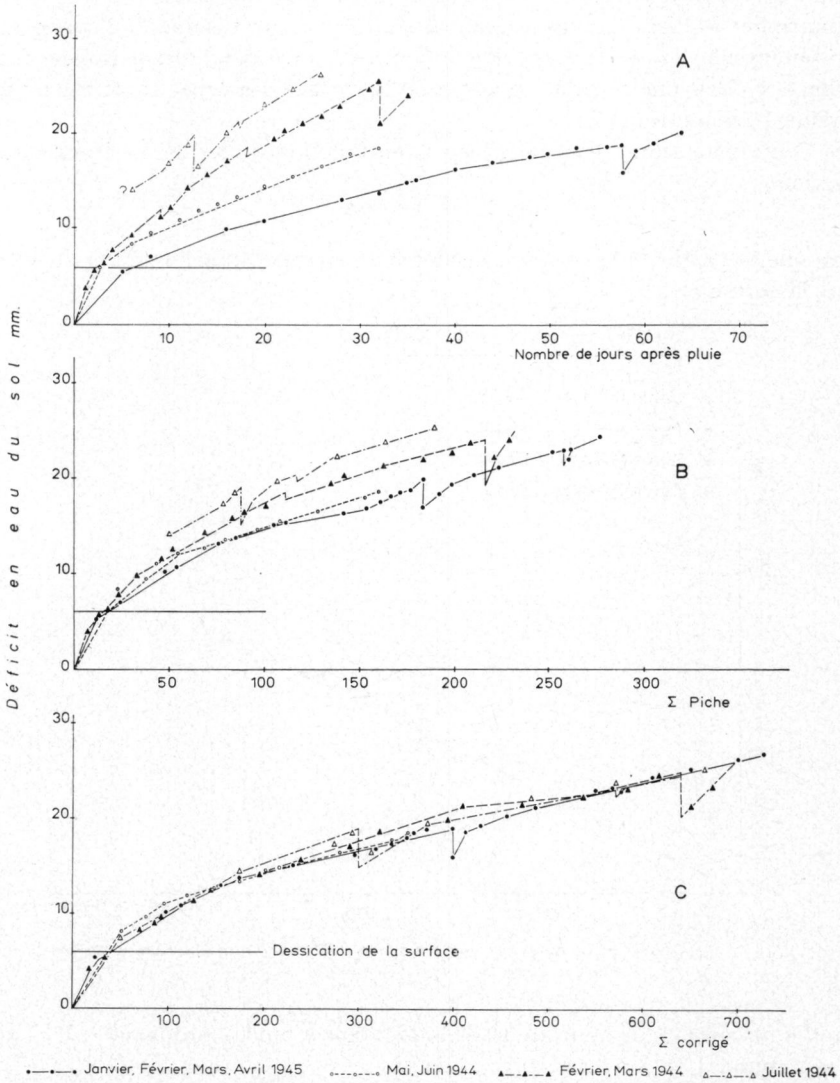


FIG. 1. — *Évaporation cumulée (déficit de saturation du sol) en millimètres, depuis une pluie ayant ramenée le sol à saturation, au cours de périodes de beau temps*
1 A en fonction du temps
1 B en fonction des valeurs cumulées du Piche
1 C en fonction des valeurs cumulées du Piche corrigé
Terre argilo-calcaire sur calcaire fissuré, Station de Bioclimatologie à Montpellier.

(linéaire et issue de l'origine) exprime la proportionnalité qui existe entre E et P ; tant que E est faible, on a :

$$E = b\ P$$

La valeur de b ne peut être établie avec précision en raison des difficultés opératoires peu après la pluie.

Au cours des trois périodes de mesure, nous avons cependant abouti à des valeurs très voisines (0,22, 0,22 et 0,23). Ce coefficient est donc celui par lequel on doit multiplier le Piche corrigé P pour obtenir la valeur absolue de l'évapotranspiration potentielle. *La deuxième partie de la courbe* correspond aux périodes où l'évaporation a dépassé une certaine valeur et où la surface desséchée constitue un mulch qui freine l'évaporation.

Si l'on ajuste alors (voir fig. 2) log E en fonction de log P, la droite obtenue, d'équation

$$\log E = 1/2 \log P$$

montre que la partie de la courbe considérée ici est une branche de parabole répondant à la formule

$$E = P^{1/2}$$

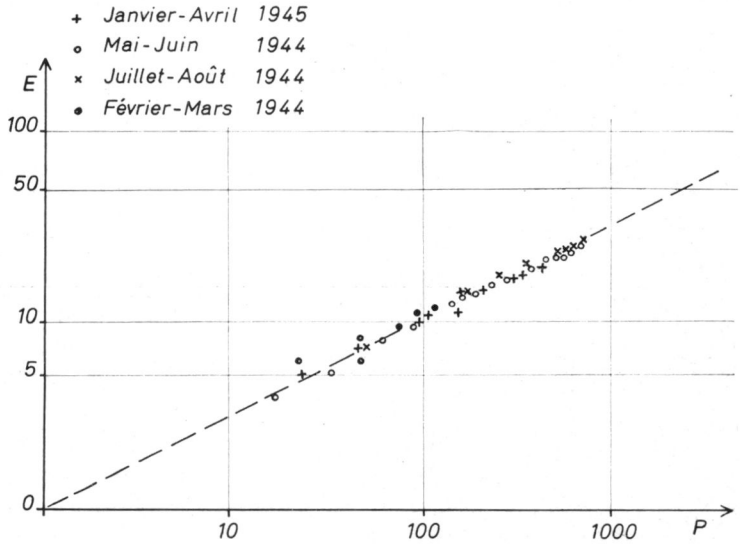


FIG. 2. — *Courbe en coordonnées logarithmiques établie à partir des mêmes valeurs que la figure 1 : log E en fonction de log P*

Le point d'intersection de la droite et de la parabole a pour coordonnées : P = 20,25 ; E = 4,5 (mm).

Quant à *la pente de la courbe* dE/dP, pente qui représente le rapport entre les valeurs journalières de l'évaporation du sol et du Piche corrigé, elle peut s'écrire

$$\frac{dE}{dP} = \frac{1}{2} P^{-1/2}$$

soit

$$\frac{dE}{dP} = \frac{1}{2E}$$

En toute rigueur la pente de la parabole au point où elle rejoint la droite

(E = 4,5 ; P = 20,5) serait donc 1/9 ≠ 0,11, alors que la pente de la droite est 0,22.

L'intensité de l'évaporation serait donc brusquement réduite de moitié au moment de l'apparition du mulch superficiel.

Ainsi, l'intensité de l'évaporation du sol (par rapport au Piche corrigé) est inversement proportionnelle à la hauteur d'eau déjà évaporée.

Ce résultat est paradoxalement simple en regard de la complexité des facteurs en jeu ; nous allons tenter de l'expliquer.

2°) Réduction de l'évaporation et desséchement superficiel du sol

De part et d'autre de la surface du sol se trouvent schématiquement deux surfaces évaporantes :

— P, la pastille du Piche, dont la température est supposée dans le calcul égale à la température moyenne de l'air ;

— E, la couche du sol humide qui, après la pluie, atteint la surface du sol, puis s'en trouve séparée par une couche de terre sèche dont l'épaisseur « z » va en croissant. Cette couche humide évapore par sa partie supérieure ; la température y oscille sensiblement autour de la température moyenne de l'air.

Les deux surfaces humides sont donc sensiblement à la même température moyenne et leur évaporation peut être comparée.

Première phase : surface du sol humide, partie rectiligne de la courbe

$$E = b\,P$$

b est le coefficient par lequel il faut multiplier les valeurs du Piche corrigé pour obtenir l'évaporation potentielle. Nous renvoyons le lecteur à l'étude de Bouchet.

Deuxième phase : surface du sol sèche, partie parabolique de la courbe

$$P = E^2$$

La formation d'une couverture de terre sèche à la surface du sol crée une couche isolante qui :

— réduit la pénétration de la chaleur dans le sol par isolement thermique ;

— ralentit la diffusion de la vapeur d'eau vers l'atmosphère.

L'action du second phénomène est dominante.

En première approximation, nous allons supposer que la résistance à l'évaporation est une fonction linéaire de l'épaisseur de la couverture « z » :

$$\frac{dP}{dE} = \alpha\, z + \beta \quad (\alpha, \text{ dimension de l'inverse d'une longueur})$$

Si l'on reporte cette valeur dans l'équation de la courbe : $dP/dE = 2\,E$, on obtient :

$$2E = \alpha z + \beta$$

$$z = \frac{2E - \beta}{\alpha}$$

Ainsi notre hypothèse impliquerait que l'épaisseur de la couverture de terre sèche soit une fonction linéaire de la quantité d'eau perdue E.

Une série de profils d'humidité du sol a été effectuée entre janvier et avril 1945, par couches de 1,5 cm d'épaisseur, malheureusement sans répétition. Nous pouvons cependant les utiliser à titre indicatif.

Pour les différentes profondeurs, nous portons, en fonction de l'évaporation cumulée E, les valeurs de σ (Ho — H) (fig. 3)

σ = densité apparente du sol : 1,07

H = humidité en p. 100 de poids sec

H_0 = 24 p. 100, valeur considérée à priori comme étant la capacité au champ.

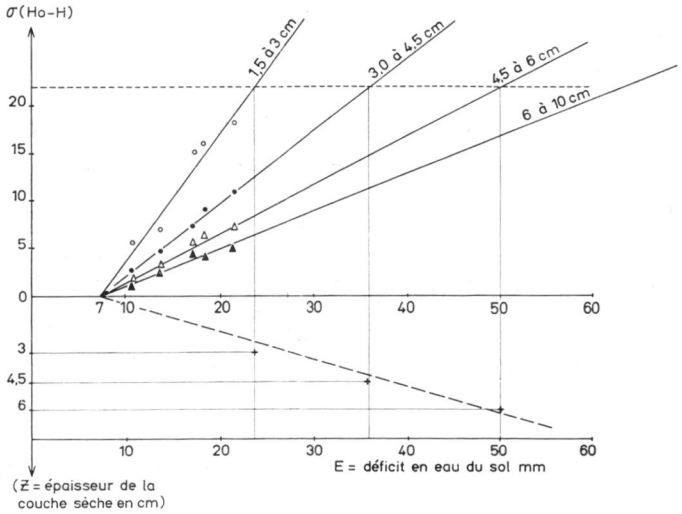


FIG. 3. — *Variation de l'humidité du sol (en volume) à différents niveaux, en fonction des quantités d'eau évaporée par le sol E en mm. Janvier-avril* 1945 :

o de 1,5 à 3,0 mm
• de 3,0 à 4,5
Δ de 4,5 à 6,0
▲ de 6,0 à 10

et variation de l'épaisseur « z » couverture sèche, en cm, déduite de valeurs précédentes

On obtient, pour chaque profondeur, une droite, comme le prévoit HALLAIRE Ces droites se coupent sur l'axe des abscisses pour E # 7 mm.

On a d'autre part observé que la surface du sol changeait de teinte pour E # 6 mm. L'intersection de la droite et de la parabole a lieu pour E = 4,5 mm. On pourrait s'attendre à ce que ces trois valeurs soient confondues.

Où ont été prélevés ces 7 mm d'eau évaporés avant que s'établisse un gradient d'humidité dans le sol?

a) Avant que le drainage ait ramené le sol à la capacité au champ, une partie de l'eau occupant les macropores est reprise par l'évaporation. L'évaporation contribue au ressuyage du sol (A. FEODOROFF et M. RAFI, 1962).

b) La dessiccation de la couche de surface, de la capacité au champ à l'humidité hygroscopique, nécessite une perte d'eau supplémentaire de quelques millimètres.

c) Aux fortes humidités, la diffusivité de l'eau D étant élevée, le transfert peut avoir lieu sur une grande profondeur (W. R. GARDNER et D. I. HILLEL, 1962) sans gradients d'humidité accentués.

En extrapolant les droites du graphique 3 jusqu'à l'intersection avec la droite (H — Ho) = 22 (terre séchée à l'air), nous obtenons les valeurs de « z » en fonction de E, il faut y ajouter la valeur $z = 0$ pour $E = 7$. Ces valeurs sont portées à la partie inférieure de la figure 3 qui montre que « z » est bien fonction linéaire de E. Ces mesures vont donc à l'appui de l'hypothèse.

3°) CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

L'étude de l'évaporation de l'eau du sol a été généralement faite en laboratoire, sur colonnes de terre, à température constante et en réglant l'intensité de l'évaporation à la surface du sol.

Les dernières publications sur ce sujet par HALLAIRE (1960), GARDNER et HILLEL (1962) et MILTHORPE (1961) font le point de la question qui, cependant, reste encore confuseen raison du poids de l'appareil mathématique mis en œuvre et des hypothèses simplificatrices.

La question peut être schématisée de la façon suivante :

a) *Première phase*

Au cours de cette phase, la surface du sol reste humide. L'intensité de l'évaporation de l'eau du sol « e » est égale à l'évapotranspiration potentielle « ep » (perte d'une surface humide placée dans les mêmes conditions que la surface du sol). Pour que cela soit possible, il faut que l'eau évaporée soit renouvelée par de l'eau provenant de la masse du sol.

Au laboratoire, quand l'humidité du sol des colonnes de terre est supérieure à la capacité au champ, la diffusivité de l'eau est élevée. GARDNER et HILLEL (1962) supposent que l'eau remonte sur tout le profil du sol. La réduction générale de l'humidité du sol entraîne une réduction de la « diffusivité » (D).

$$D = D_0 \exp. a\,(H - Ho) \qquad D_0 \text{ et } a = \text{constantes ; } H = \text{humidité}$$

La première phase prend fin quand l'alimentation de la surface du sol en eau ne permet plus de satisfaire à l'évaporation potentielle « ep ». Sa durée est d'autant plus grande que « ep » est plus faible. GARDNER et HILLEL en donnent l'expression. Par exemple, d'après leurs graphiques, pour une couche de terre de 125 cm, gorgée d'eau, cette phase dure environ :

2 jours avec « ep » journalière de 20 mm ;
22 jours avec « ep » journalière de 5,9 mm ;
60 jours avec « ep » journalière de 3 mm ;

La quantité d'eau perdue au cours de cette phase est d'autant plus faible que « ep » est plus élevée.

En plein champ, cette phase est de beaucoup plus courte durée (quelques jours).

En été, même en terre argileuse, avec une *ep* = 5,9 mm/jour, la surface sèche en moins de 4 jours. Dans le cas de notre exemple, l'humidité disparaît de la surface du sol quand celui-ci a perdu 6 mm d'eau à peu près en toutes saisons, c'est-à-dire quel que soit « ep ».

Cette différence pourrait s'expliquer par des considérations telles que celle-ci :

Il n'y a pas de drainage dans les expériences de laboratoire. In situ, le sol revient à la capacité au champ en deux jours environ ; que ce soit sous l'effet de l'évaporation ou du drainage, ou sous l'effet de ces deux facteurs à la fois.

Si « ep » est très forte, l'évaporation l'emporte sur le drainage, les résultats obtenus en plein champ doivent être voisins de ceux obtenus en pot (sans drainage).

Si « ep » est très faible, le drainage l'emporte sur l'évapotranspiration ; en plein champ, la surface du sol se dessèche alors que les pertes totales par évaporation E sont encore très réduites.

Par exemple, à Tunis, nous avons constaté que la surface d'un limon changeait de teinte quand les pertes d'eau par évaporation E atteignaient :

E = 18 mm en juin et en novembre ;
E = 5 mm en février ;

Pour un sable :

E = 6 mm en juin ;
E = 2 mm en novembre ;
E = 2 mm en février.

Ceci est opposé aux constatations faites en laboratoire : E d'autant plus grand que « ep » est plus faible.

Si « ep » a une valeur moyenne, E est sensiblement constant et indépendant de « ep » au cours de la première phase.

Ceci expliquerait que, dans le cas de notre exemple, E est, en toute saison, voisin de 6 mm.

D'autre part, la première phase peut être « accidentellement » interrompue par une valeur forte mais passagère de « ep » entraînant la dessiccation irréversible de la surface du sol ; ce qui complique encore la question.

b) *Phase de transition*

Lorsque la surface du sol sèche, ce qui est très visible en raison du changement de teinte, l'évaporation diminue brusquement.

Le 22 juin 1962, nous avons suivi cette phase sur terres des cases lysimétriques à Tunis.

ep = évaporation potentielle ; *e* = évaporation réelle.

Sur les cases de sable, la surface a séché le 23 juin entre 8 h 30 et 11 h 45 ; le lendemain, l'évaporation est réduite au quart de « ep ».

Sur limon et terre rouge, le desséchement de la surface a dû avoir lieu le 25, peu avant l'observation de 9 h ; après renouvellement des échantillons, on constate, entre 10 h et 12 h, que l'évaporation a été réduite au quart de « ep ».

La dessiccation de la surface du sol provoque une discontinuité dans le phénomène d'évaporation, tant sur le plan de transmission de la chaleur que de la vapeur d'eau. Le fait que le rayonnement solaire élève la température d'un grain de sable

au lieu de celle d'une pellicule d'eau entraîne nécessairement une plus grande perte de chaleur vers l'atmosphère et une diminution de la fraction du rayonnement net utilisée pour l'évaporation. Inversement, le frein à la diffusion de la vapeur d'eau, exercé par les particules solides, réduit l'évaporation et diminue d'autant les besoins en chaleur de vaporisation. En suivant les variations de température à différents niveaux, dans un sable humide placé dans un vase Dewar et évaporant à sa surface dans des conditions atmosphériques constantes, CHAUSSAT et PRADINES observent que la température passe progressivement de celle du thermomètre humide à celle du thermomètre sec, sans qu'on constate de grandes différences de gradients. Le deuxième phénomène, diffusion de la vapeur d'eau, l'emporte ici sur le premier (transmission de la chaleur) (1).

Dates		22/6		23/6			25/6	
Heures		15 h 15	18 h 30	8 h 30	11 h 45	9 h	10 h	12 h	17 h
	Sable	0,9	0,8	sec 0,42	0,26	sec		0,12	0,08
e/ep	Limon	1,1	1,0	1,2	1,02	sec		0,23	0,28
	Terre rouge	1,1	0,8	0,96	1,07			0,23	0,32

c) *Deuxième phase*

Au cours de la deuxième phase, en laboratoire, la courbe de $E = f(t)$, évaporation E en fonction du temps t, est, d'après GARDNER et HILLEL, la même, quelle que soit l'évaporation potentielle.

L'évaporation réelle ne dépend plus que du débit d'eau liquide dans le sol, et donc de l'état de dessiccation du sol.

In situ, nos observations conduisent à une conclusion opposée : *l'évaporation réelle « e » est proportionnelle à l'évaporation potentielle « ep »*. Cette observation est en accord avec la théorie de HALLAIRE, l'évaporation commandant la migration de l'eau dans le sol.

Cependant, le coefficient de proportionnalité varie comme l'inverse de la quantité d'eau déjà évaporée E. Il dépend de l'état de dessiccation du sol (fig. 1).

Cette différence fondamentale paraît être la conséquence de ce que nous venons de voir au paragraphe précédent. La formation d'une couverture de terre sèche, qui est négligée dans la théorie de GARDNER et HILLEL, dépend de l'évaporation potentielle de pointe et du débit maximal d'eau liquide, donc de E.

Par la suite, tout au cours de la journée, la vapeur d'eau diffuse à travers cette couverture en fonction du gradient des pressions et donc de l'évaporation potentielle

(1) Résultats non publiés.

« ep ». Ceci paraît pouvoir se déduire des travaux de PENMAN et, à Montpellier, de DAMAGNEZ (1959).

Au cours de cette période, la théorie d'HALLAIRE est en accord avec les observations ; l'évaporation paraît commander la migration de l'eau dans le sol. Elle explique d'ailleurs, aussi bien que la théorie de GARDNER et HILLEL, pourquoi les petites pluies sont inefficaces.

II. — INFLUENCE DE LA NATURE DU SOL

A ma connaissance, aucun résultat de laboratoire ne met en relief l'influence de la nature des terres sur l'efficacité des pluies, alors qu'il est de notoriété publique qu'au voisinage des déserts, seuls les sables restent cultivables ou, plus exactement capables de porter une végétation arbustive.

Dans ce but, au Centre d'étude de l'eau de Tunis, nous avons rempli, par horizons successifs, des cases lysimétriques cubiques de 2 m d'arête avec notamment :

— un limon argilo-calcaire, capacité au champ # 24 p. 100 en poids

— un sable de dune, capacité au champ # 6 p. 100 en poids.

Les cases étant cultivées en assolement, il a fallu profiter d'une période de repos pour faire les mesures en sol nu.

1°) PERCOLATIONS

La saturation des terres a été assurée, d'une part par des irrigations d'été et de fortes pluies d'octobre-novembre (127,1 mm) ; d'autre part, après le 1er décembre, par les pluies d'hiver. Le drainage a été observé entre le 1er décembre 1961 et le 31 mai 1962. L'état d'humidité devait être peu différent le 31 mai 1962 de ce qu'il était au 1er décembre 1961 (percolations très faibles).

Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Drainage des cases lysimétriques du centre d'étude de l'eau de Tunis. Terre nue. 1.12.1961 au 31.5.1962.

Mois	ETP (mm)	Pluie (mm)	Pluie des périodes les plus efficaces (mm)	Percolations	
				Limon	Sable
Décembre 61	45,0	45,4	0	2,6	8,4
Janvier 62	27,0	52,8	29 au 31 : 28,6	1,8	9,5
Février 62	57,3	57,5	11 au 16 : 55,9	13,1	22,6
Mars 62	93,8	35,4	21 au 24 : 15,9	3,1	3,4
Avril 62	104,4	37,2	10 au 15 : 11,9 22 au 25 : 16,1	14,6	29,3
Mai 62	131,5	13,9	0	9,7	17,2
Totaux	459,0	242,2	128,4	44,9	90,4

Les pluies ont été à peu près deux fois plus efficaces sur sable que sur limon, c'est-à-dire que, sur limon, les pertes par évaporation ayant été de près de 200 mm, une quarantaine de mm seulement ont pu être gagnés et ont pu percoler, alors que le sable a gagné 90 mm. Les cases étant limitées par des murettes, il n'est pas question de ruissellement.

Dans l'ensemble, la pluviométrie ayant été anormalement bien répartie, l'effi-

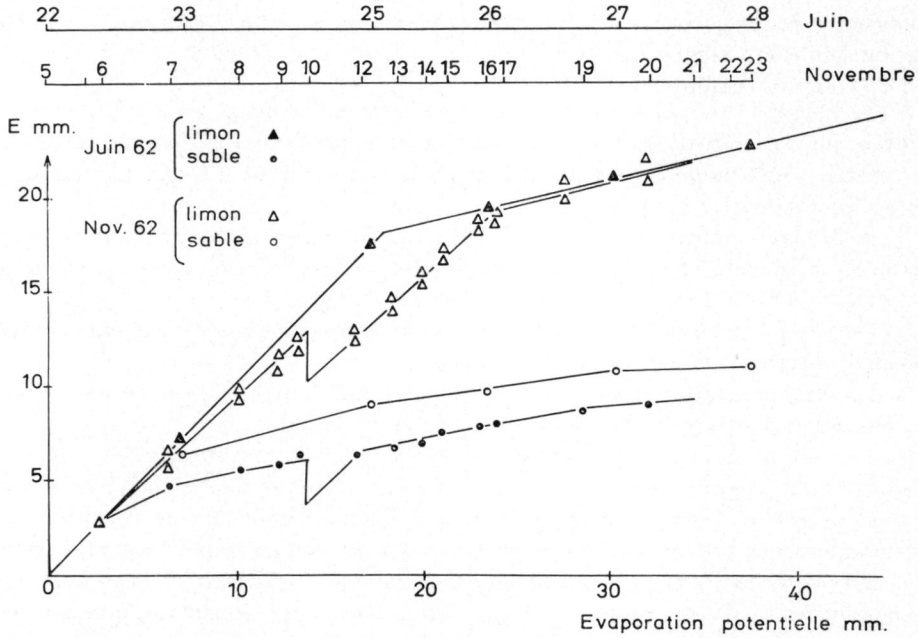


FIG. 4. — *Évaporation cumulée E en mm, depuis une pluie ou irrigation ayant ramené la terre à saturation, en fonction de l'évaporation potentielle ep cumulée en mm*
Limon — Sable — Ecole. Sup. Agri. T. — Tunis

cacité des pluies fut particulièrement faible. La surface du sol est restée humide pendant presque tout l'hiver sur les cases de limon, l'évaporation a été par suite voisine du maximum (ETP) en décembre, janvier, février.

2°) ÉVAPORATION

Après saturation de la terre des cases par les pluies ou par irrigation, la mesure de l'évaporation a été faite par la méthode utilisée à Montpellier. L'évaporation potentielle a été mesurée directement par pesées de boîtes de terre humide (avec anneau de garde).

La figure 4 donne le déficit en eau du sol E en fonction de l'évaporation potentielle cumulée « E_p » pour deux périodes :

juin 1962 et novembre 1962.

Les courbes se superposent à peu près pour le limon et sont parallèles pour le sable.

a) L'intensité de l'évaporation diminue brutalement quand le déficit en eau dépasse environ :

18 mm pour le limon (capacité au champ = 24 p. 100) ;

5 à 6 mm pour le sable (capacité au champ = 6 p. 100).

La pente, qui était de 1 pour la droite, tombe aux environs de 0,2 (plus de 0,2 pour le limon, moins de 0,2 pour le sable), quand la surface est sèche.

Dans ce cas particulier, les cases venant de recevoir une irrigation de lessivage, l'efficacité des irrigations sur sable est particulièrement nette. Les pertes par évaporation sont d'environ 20 mm pour le limon et 8 mm pour le sable, en 4 jours (juin) ou 11 jours (novembre).

b) La pluie de 3 mm du 10 novembre 1962 a été évaporée sans modifier la marche de la dessiccation du sol. On doit admettre que l'eau apportée par cette pluie est restée « suspendue » ; le potentiel de l'eau à la surface du sol étant plus faible qu'en profondeur.

c) Si l'on rapporte les valeurs de l'évaporation réelle Er à l'évaporation potentielle E_p, la saison n'intervient pas, puisque nous obtenons les mêmes courbes en juin et en novembre.

Ceci doit être en partie imputé au processus expérimental, la terre étant préalablement saturée (et en particulier refroidie).

En été ou en automne, lorsque les pluies humectent au contraire les horizons de surface d'une terre profondément desséchée et chaude :

— l'eau migre rapidement en profondeur, comme l'a montré RIOU [1], en raison de son faible potentiel dans le sol. L'humidité est ramenée à la capacité au champ.

— le sol se comporte comme une couche chaude (phénomène favorable à la germination des premiers semis d'automne). La tension de vapeur est plus élevée.

En plein champ, la surface du sol se desséchait très rapidement en novembre 1962, dans tous les cas beaucoup plus vite que dans les cases qui venaient d'être saturées. Début novembre 1961, au contraire, les cases n'ayant pas été saturées, la surface du limon avait séché après une perte de 10 mm d'eau seulement. Pour la partie rectiligne, le rapport : évaporation réelle/Piche corrigé était de 0,5. Il tombait à 0,2 fin novembre après trois pluies.

Dans la plupart des conditions expérimentales, cependant les pertes par évaporation sont plus faibles sur sable que sur limon.

IV. — RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Les résultats que nous avions obtenus autrefois en plein champ sur l'évaporation de l'eau du sol nous ont permis de confirmer et de discuter les observations faites en laboratoire par différents auteurs.

E étant la quantité d'eau perdue par évaporation, en mm, depuis la dernière pluie de saturation, et P les valeurs cumulées du Piche corrigé depuis cet instant, nous avons pu écrire les relations :

$E = bP$: avant que la surface du sol ne se dessèche, b étant une constante ;

$P = E^2$: après cet instant.

[1] Étude en préparation.

Ces relations sont anormalement simples et en contradiction avec certains résultats de laboratoire. En plein champ, surtout dans le cas d'une terre rouge sur calcaire fissuré de Montpellier, le drainage (qui n'intervient pas en pot), contribue, avec l'évaporation, à ramener l'humidité du sol à la capacité au champ, La surface du sol se dessèche alors rapidement (à Montpellier pour E = 6 mm). A partir de cet instant, l'épaisseur « z » de la couverture de terre sèche (mulch), est proportionnelle à la quantité d'eau évaporée. La résistance à la diffusion de l'eau du sol étant proportionnelle à « z », ceci expliquerait l'allure parabolique des courbes d'évaporation.

Nous trouvons une évaporation intense après pluie, puis une évaporation réduite ; mais l'évaporation de l'eau du sol est toujours directement fonction de l'évaporation potentielle, contrairement à ce qui est observé en laboratoire. On peut expliquer cette divergence par la formation et l'épaississement progressif d'une couverture de terre sèche. En plein air, la couverture se forme et s'épaissit au moment de l'évaporation maximale journalière (son épaisseur « z » dépend de l'humidité du sol). Par la suite, cette couverture isolante crée une résistance au transfert de vapeur qui reste cependant fonction des gradients de tension. En laboratoire, en conditions constantes, c'est la vitesse de migration de l'eau liquide dans le sol qui est à chaque instant le facteur limitant de l'évaporation ; la couverture de terre sèche et son action sur les échanges de vapeur d'eau ne sont plus que des conséquences.

L'évaporation étant fonction de l'évaporation potentielle, nos résultats paraissent confirmer la théorie de HALLAIRE : la remontée de l'eau dans le sol est commandée par l'évaporation.

Nos observations paraissent confirmer la théorie de BOUCHET. Les valeurs du Piche corrigé sont en corrélation étroite avec l'évaporation de l'eau du sol. Nous trouvons même une relation du second degré très simple entre ces données. D'après l'expression de BOUCHET, le Piche corrigé pourrait être un faux témoin, influencé par les mêmes facteurs que l'évaporation de l'eau du sol ; cette question sera traitée par d'autres auteurs ; il est plus gênant pour nous de constater que le Piche est fortement influencé par la vitesse du vent et qu'il est peu fidèle.

Dans une deuxième partie, nous comparons les pertes d'eau sur un limon et sur un sable dans le but de traiter du problème écologique suivant : la pluie est très efficace sur sable ; de telle sorte qu'au voisinage des déserts, seuls les sables restent cultivables. En régions tempérées, par contre, le sable est considéré comme un sol sec.

On met facilement en évidence que la couverture de terre sèche se formant près de trois fois plus vite sur notre sable que sur notre limon, les pertes d'eau par évaporation y sont réduites.

En région sub-désertique, on augmente l'alimentation en eau des végétaux en étendant la surface de terre nue laissée à leur disposition. Ceci n'est possible, que si l'eau reçue par cet impluvium n'est pas perdue en majorité par évaporation c'est-à-dire sur sable. En région tempérée, il n'est plus question de terre nue (si ce n'est par manque de fertilité chimique), on ne retient du sable que sa faible capacité pour l'eau et on le considère comme un sol sec.

Reçu pour publication en avril 1963.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les anciens et jeunes bioclimatologistes de l'I.N.R.A et de l'O.R.S.T.O.M. (particulièrement M. RIOU) qui nous ont encouragé à reprendre ce travail et documenté ; ainsi que le personnel de la Chaire d'Agriculture de l'E.S.A.T., et particulièrement M. MOUSSET, qui nous a fourni un complément d'information nécessaire.

SUMMARY

THE EVAPORATION OF WATER FROM SOIL

Evaporation from bare soil shows simple relationships with potential evapotranspiration determined from evaporation under screen.

ZUSAMMENFASSUNG

VERDUNSTUNG DER BODENWASSERS

Die Evaporation des planzenlozen Bodens ist auf einfache Art an die, an geschützer Stelle ermittelte potentielle Evapotranspiration, gebunden.

РЕЗЮМЕ

Испарение влаги почвы.

А. Вернэ (Нац. Сельскохоз. Институт).

Испарение влаги голой почвой может находиться в простой связи с потенциальной эвапотранспирацией выражающейся испарением под прикрытием.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DAMAGNEZ J., 1959. Rôle du Mulch naturel ou artificiel sur la dynamique et l'économie de l'eau dans le Languedoc méditerranéen. *C. R. Acad. Agric.*, **45**, 237-241.

FEODOROFF A., RAFI Mohamed, 1962. Évapotranspiration de l'eau à partir d'un sol nu. Les trois stades de l'évaporation. Note. *C. R. Acad. Sci.*, **255**, 23, 3220-3222.

GARDNER W. R., HILLEL D. I., 1962. The relation of external evaporative conditions to the Drying of soils. *Geophys. Res.*, **67**, 11, 4319-4325.

GARDNER W.R., 1961. Les relations entre le sol et l'eau dans les climats arides et semi-arides. *U.N.E.S.C.O, Recherches sur la zone aride. Échanges hydriques des plantes en milieu aride ou semi-aride*, 41-68.

HALLAIRE M., 1960. Mécanisme de la diffusion de l'eau dans le sol vers une surface d'évaporation. *Cahiers de la recherche théorique et expérimentale sur les matériaux et les structures* n° 10, Eyrolles, Paris.

MILTHORPE F.L., 1961. L'apport et la déperdition d'eau dans les régions arides et semi-arides. *U.N.E.S.C.O, Recherches sur la zone aride. Échanges hydriques des plantes en milieu aride ou semi-aride*, 9-40.

PENMAN H. L., 1941. Laboratory experiments on evaporation from fallow soil. *J. Agrid. Sci.*, **31**, 454-465.

PENMAN H. L., SCHOFIELD R. K., 1941. Drainage and evaporation from fallow soil at Rothamsted. *J. Agric. Sci.*, **31**, 74-109.

PENMAN H. L., 1949. The dependence of transpiration on weather and soil conditinos. *J. Soil Sci.*, **1**, 74-89.

RUSSELL E. J. (sir) ,1950. *Soil conditions and Plant growth* (eighth edition), 357-383. Tangmans, Green and Co.

VERNET A., 1944. Sur un procédé de mesure de l'évaporation du sol. *C R. Acad. Agric.*, **30**, 375-377.

VERNET A., 1945. Les pertes d'eau du sol par évaporation dans le Languedoc méditerranéen. *C. R. Acad. Agric.*, **31**, 532-536.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 601-613.

ÉVAPORATION DE L'EAU A PARTIR DU SOL NU

RÔLE DE L'ÉTAT STRUCTURAL

A. FÉODOROFF et M. RAFI

Laboratoire d'Étude des Techniques culturales,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Dans un sol nu contenant de l'eau suspendue, c'est-à-dire reposant sur un substrat plus sec, l'évaporation s'exerce suivant 3 stades consécutifs : un premier stade à débit constant tant que le sol est gorgé d'eau, un deuxième stade à débit rapidement décroissant à partir du moment où le sol est ressuyé, et un troisième stade à faible débit résiduel, très lentement décroissant qui conduit, en l'absence prolongée de pluie, à un desséchement prononcé des couches profondes du sol, et peut même entraîner à la longue l'épuisement total des réserves, du moins dans les conditions du laboratoire.

L'influence de l'état structural, étudiée au laboratoire sur des agrégats < 1 mm et de 5 à 10 mm d'un sol argilo-limoneux, n'est nette que dans le stade initial de l'évaporation. Dans un climat peu évaporant, le sol agrégé évapore plus. Dans un climat fortement évaporant, le sol agrégé évapore moins. A chaque instant il existe donc une différence entre la perte totale par évaporation du sol nu tassé et celle du sol agrégé. Dans les conditions de nos essais cette différence est au maximum de 5 à 10 mm d'eau et va en s'amenuisant avec le temps.

I. — INTRODUCTION ET OBJET DE L'ÉTUDE

L'économie de l'eau en agriculture pose des problèmes considérables dans de nombreuses régions. Dans les régions les plus développées, le déficit plus ou moins chronique en eau de pluie est comblé par des irrigations. Mais parallèlement à l'irrigation, il est raisonnable de chercher à réduire les pertes par évaporation des eaux fournies par la pluviométrie naturelle. Une des techniques anciennement préconisée et appliquée est le binage, dont on disait même qu'il « vaut deux arrosages ». Mais ce point de vue a été fortement combattu, sans que pour autant les praticiens abandonnent la technique. Il a donc paru intéressant de reprendre son étude.

La première considération qui nous a guidé est que le binage est une opération qui produit, en plus d'une action de désherbage, un double effet sur la structure du sol :

a) elle modifie l'état de la surface du sol, en le faisant passer d'un état compact et tassé à un état agrégé,

b) elle crée une discontinuité entre le sous-sol intact et la surface remaniée.

Pensant que dans une étude analytique il convient de dissocier ces deux facteurs, nous nous sommes penchés exclusivement sur l'influence de l'état structural sur l'évaporation.

Alors qu'une très abondante littérature est consacrée aux effets du binage et à l'influence de l'état de la surface du sol sur l'évaporation, à notre connaissance il n'existe que deux études consacrées à l'influence de la dimension des agrégats (BUROV, 1952 ; HOLMES et *al.*, 1960), encore que ces auteurs aient constamment alimenté le sol en eau par une nappe relativement proche de la surface. Il nous a semblé intéressant de voir le comportement à l'évaporation de l'eau suspendue en fonction de l'état structural, car ce cas se rapproche le plus de ce qui se produit dans le milieu naturel pendant les périodes de déficit en eau.

Cette étude reprend et complète certains résultats d'une thèse de Docteur du 3e Cycle soutenue récemment par l'un de nous (RAFI, 1962).

II. — MÉTHODE DE RECHERCHE ET DISPOSITIF DES EXPÉRIENCES

La méthode de recherche a consisté à laisser évaporer dans diverses conditions de laboratoire, des colonnes de sol préalablement arrosé à la surface.

Pour obtenir deux états structuraux différents, on a séparé dans un sol donné, par tamisage à sec, des agrégats de 5 à 10 mm de diamètre. Une partie de ces agrégats est écrasée, de façon à passer à travers un tamis de 1 mm. Ainsi seule la dimension des agrégats distingue ces deux fractions, la fraction < 1 mm représentant la terre compacte et tassée, la fraction de 5 à 10 mm représentant le sol agrégé et meuble. Il s'agit du sous-sol limoneux de Versailles dont la composition granulométrique est la suivante.

Argile < 2 μ	28,00 %
Limon fin 2-20 μ	22,00 %
Limon grossier 20-50 μ	35,55 %
Sable fin 50-200 μ	13,00 %
Sable grossier 200-2 000 μ	0,75 %
Matière organique	0,70 %
Humidité à pF 4,2	10,6 %
Capacité de rétention	26-27 %

La terre ainsi préparée est introduite dans des tubes en verre ou en plexiglass munis à l'intérieur d'un manchon en polyéthylène afin d'empêcher le décollement éventuel de la terre de la paroi du tube, de façon que toute l'évaporation se produise exclusivement par la surface du sol. Nous avons utilisé des tubes de 12,30 et 100 cm de longueur et respectivement 44, 8,5, 50 cm² de section ; cependant dans chaque série on a utilisé des tubes de la même dimension. L'expérience nous a montré que la différence due à la dimension des tubes n'est pas sensible tout au moins dans nos conditions d'expérience et avec notre échelle de précision.

Les tubes remplis de terre sèche sont soumis à un arrosage intense (5 mm/mm) ou ménagé (0,2 mm/mm) ce dernier par un dispositif à niveau constant en adaptant des tubes capillaires appropriés pour avoir le débit recherché. Suivant l'intensité de l'arrosage, on peut obtenir des profils hydriques initiaux différents (A. FEODOROFF, 1961). La dose d'eau ajoutée est contrôlée par pesée. Une fois l'arrosage terminé, on couvre la partie supérieure du tube afin d'empêcher l'évaporation ; on attend quelques jours jusqu'à ce que la progression du front soit imperceptible, puis on découvre la surface et on met à l'évaporation. Toute l'eau contenue dans le sol est donc suspendue, car de la terre sèche se trouve sous la partie humectée.

Dans les conditions d'évaporation lente, on se contentait de protéger extérieurement la paroi des tubes par un papier opaque, trandis que dans les conditions d'évaporation intense, on a protégé d'une part la paroi par une gaine cylindrique en laine de verre épaisse et d'autre part la partie exposée de la surface des tubes par des réflecteurs afin d'empêcher l'échauffement direct des tubes. Le'évaporation lente était obtenue en plaçant les tubes dans les conditions normales du laboratoire. Les conditions d'évaporation intenses étaient obtenues en disposant à 60 cm environ au-dessus des tubes, des lampes de 150 watts dont l'intensité était quelque peu réduite par un rhéostat. Ce dispositif fonctionnait jour et nuit.

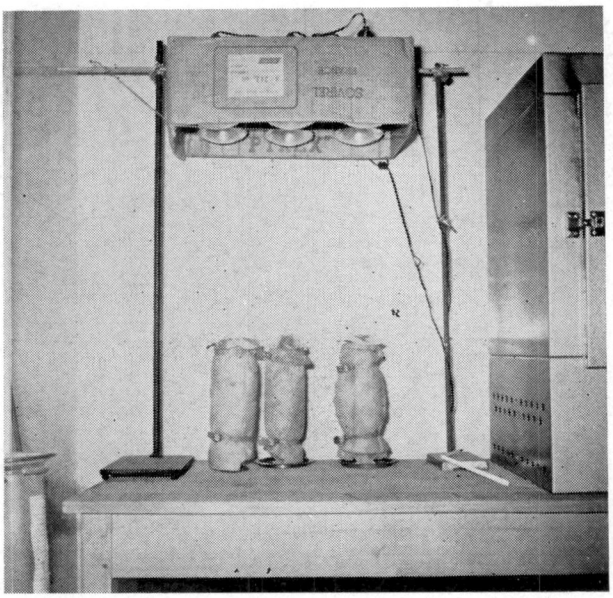


FIG. 1. — *Colonnes de terre habillées de laine de verre et munies d'un réflecteur. Système de chauffage par lampes*

La perte par évaporation est mesurée par pesée journalière. Les intervalles sont plus courts au début de l'essai, mais vers la fin de l'essai le taux d'évaporation étant réduit on ne voyait plus la nécessité d'une telle précision et on se contentait de peser à des intervalles de temps de plus en plus espacés. La perte de poids a été ramenée au mm de hauteur d'eau par la simple équation $P/S \times 10$, P étant la perte en c. c. et S la section du tube (sensiblement la surface évaporante du sol) en cm^2. Cette perte exprimée en millimètres correspondant à un intervalle de temps donné nous permet de calculer le débit d'évaporation journalier q mm/j. L'ensemble des pertes à partir du départ jusqu'à un certain temps (t) nous indique l'évaporation cumulée e mm. Paradoxalement, à la fin des essais, la valeur de e dépasse la dose initialement apportée au sol. Cela correspond au fait que la terre séchée au laboratoire contient une faible quantité d'eau qui peut s'évaporer.

Un tube de même diamètre rempli d'eau est soumis à la même évaporation à titre de référence. Il permet de mesurer le débit d'évaporation Q mm/j et l'évaporation cumulée E mm du plan d'eau libre. Ces données caractérisent les conditions climatiques ou l'évaporation potentielle EP. Le plan d'eau dans le tube est maintenu autant que possible au même niveau que la surface des sols.

En cours d'évaporation les tubes de chaque série sont successivement sacrifiés pour établir des profils hydriques. Les échantillons sont prélevés en double à différents niveaux. L'humidité est déterminée après séchage à l'étuve à 105° pendant une nuit.

Ainsi l'ensemble des déterminations effectuées nous a permis de suivre parallèlement l'allure des phénomènes d'évaporation et les modifications des profils hydriques.

III — RÉSULTATS — ALLURE GÉNÉRALE DU PHÉNOMÈNE D'ÉVAPORATION

En considérant l'ensemble de nos résultats, on peut avoir au premier abord une idée sur l'allure générale du phénomène pour les différents sols, dans les différentes conditions climatiques, avec des profils hydriques initiaux variés.

Tout d'abord les courbes de déficit cumulé en fonction soit du temps soit de l'évaporation potentielle cumulée (E) ont une allure logarithmique à forte croissance initiale qui s'enfléchit de plus en plus. Ce résultat est classique.

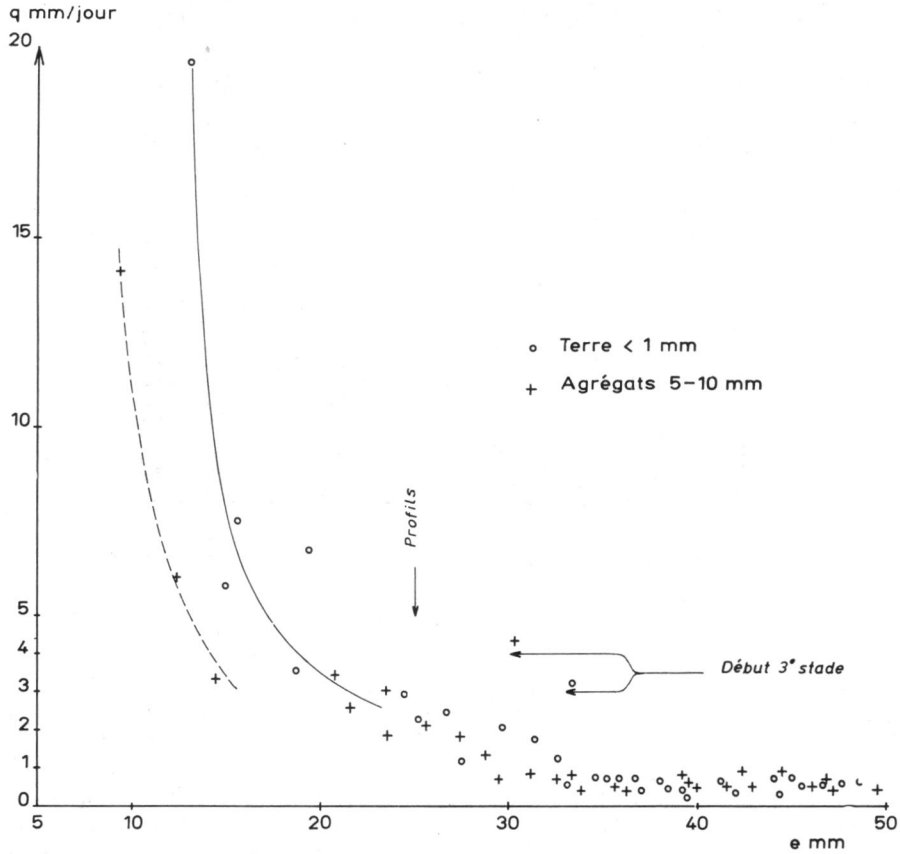


FIG. 2. — *Évolution du débit d'évaporation pour deux états structuraux*
Réserve initiale 60 mm. EP : 27 mm/j

Mais les résultats les plus intéressants sont obtenus en examinant les courbes de débit (q) en fonction de la perte totale par évaporation. Dans certains cas, lorsque les conditions d'évaporation du milieu ne sont pas très constantes, nous avons utilisé de préférence les courbes de débit relatif (q/Q) en fonction de e. L'examen de ces courbes montre qu'il y a trois branches :

1°) La première est une droite horizontale indiquant un débit constant et élevé

comparable à celui du plan d'eau libre. Ce palier ne se manifeste que lorsque l'humidité initiale du sol est supérieure à une certaine valeur, de l'ordre de la capacité de rétention mais dont le sens reste à définir. Pendant cette période la surface du sol reste visiblement humide. Ceci correspond au *premier stade de l'évaporation* (A. FÉODOROFF, M. RAFI, 1962 *a*). Dans les essais décrits ici, ce stade n'apparaît pas.

2°) La seconde partie de courbe s'amorce brusquement, et elle est rapidement décroissante. Elle correspond à l'assèchement de la surface du sol. Cette branche de courbe est observée dans tous nos essais, mais les pentes sont très variables. Elle

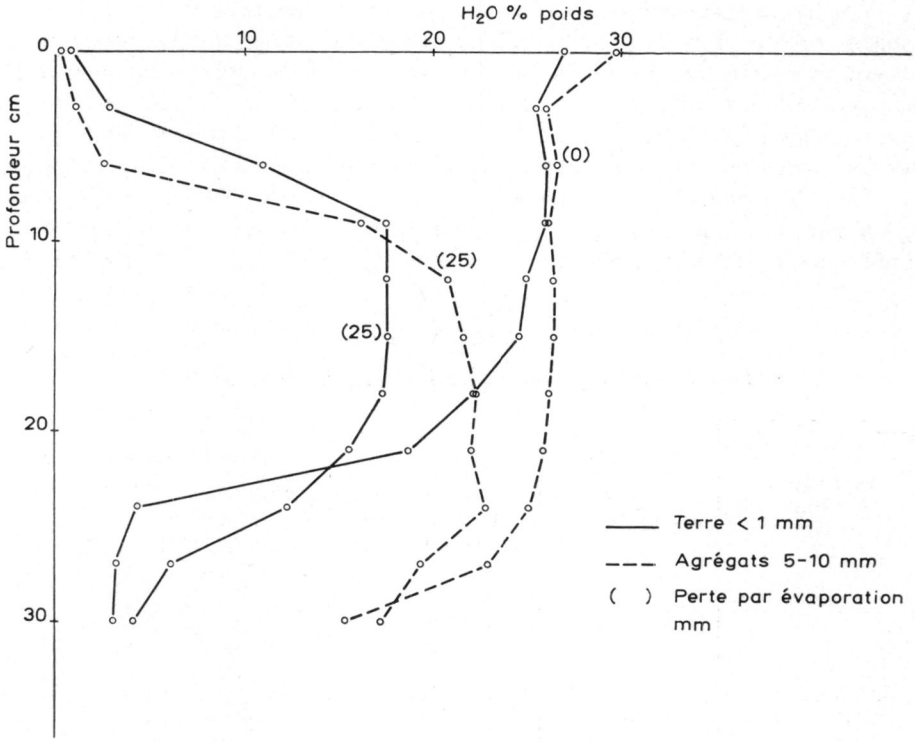


FIG. 3. — *Évolution des profils hydriques pendant l'évaporation* (EP = 27 mm/j)

caractérise le *deuxième stade* de l'évaporation (fig. 2). Les profils hydriques correspondant à cette période présentent un assèchement prononcé en surface (fig. 3), comme nous l'avons montré par ailleurs (A. FÉODOROFF, M. RAFI, 1962 *b*).

3°) La troisième partie est une droite à très faible pente négative qui représente un débit faible presque constant (débit résiduel) pendant tout le reste de l'évaporation. C'est le *troisième stade* de l'évaporation qui peut conduire à l'épuisement total des réserves. Il est caractérisé par un profil hydrique à allure particulière, avec une *concavité* vers la surface dans les couches superficielles. En profondeur au contraire la répartition de l'eau est homogène, et les mouvements se passent sans gradient d'humidité. A la longue ils peuvent conduire à une dessiccation très poussée.

IV. — RÉSULTATS RELATIFS A L'EFFET DE LA STRUCTURE

Nous allons analyser successivement l'effet de la structure dans les stades successsifs de l'évaporation, après quoi nous considérerons son effet global.

A. — Influence de l'état structural au début de l'évaporation

Comme dans ces comparaisons les sols sont initialement ressuyés, c'est-à-dire à la capacité de rétention, le premier stade ne se manifestait pas, le débit allait immédiatement en décroissant, mais nous pouvons comparer le premier débit mesuré dans des conditions par ailleurs comparables.

L'examen du tableau I montre qu'il a des différences entre les débits initiaux des deux structures, mais ces différences ne sont pas toujours dans le même sens.

Dans les conditions de faible évaporation potentielle (EP < 4 mm/j), le sol agrégé perd plus que le sol fin, et peut même perdre plus que le plan d'eau libre. Ce résultat paradoxal a première vue pourrait s'expliquer ainsi : la surface totale de

TABLEAU I

Influence de l'état structural sur le débit initial d'évaporation

Évaporation potentielle (mm/j) EP	Réserve initiale (mm)	Intervalle de temps (j) ayant servi à calculer le débit	Débit initial d'évaporation (mm/j)	
			Agrégats < 1 mm	Agrégats 5-10 mm
2,6	60	1	2,3	3,1
3,3	32	1/4	2,2	2,8
4 à 6	50	2	6,3	4,2
24	212 et 200	1/3	25,6	15,7
41	60	2/3	19,6	14,1

contact entre l'air ambiant et le sol humide est plus grande lorsque le sol est agrégé. Il n'est pas exclu également que de l'air non saturé d'humidité pénètre entre les agrégats, donc dans la masse du sol agrégé, ce qui serait difficilement pensable avec un sol humide et tassé. Toujours est-il que cet effet est de courte durée, et il ne contribue qu'à une faible perte d'eau, de l'ordre de quelques mm dans les conditions de nos essais.

Les résultats de Burov (1952) et de Holmes et *al.* (1960) vont d'ailleurs dans le même sens. Burov a étudié les pertes par évaporation de quatre classes d'agrégats < 0,5 mm, 0,5 à 3, 3 à 10 et 10-50 mm, avec des récipients de 10 cm de profondeur, périodiquement réalimentés en eau et placés en plein champ. Il a constaté que l'évaporation était la plus forte avec les agrégats les plus gros, alors que dans les trois

fractions inférieures il n'y a pas de classement net. Les résultats rapportés par HOLMES (1960) montrent de plus que le vent accentue encore cet effet.

Dans les conditions d'évaporation potentielle élevée, le classement des débits s'inverse : le sol fin perd plus que le sol structuré. Les chiffres montrent que la différence est assez considérable. Tout ce passe comme si, avec l'augmentation (pour des essais différents) de l'évaporation potentielle instantanée, le facteur limitant du débit initial cesse d'être le climat pour être le sol. En effet le sol tassé humide, et situé à la capacité de rétention, fournit au début de l'évaporation un débit sensiblement égal à celui du plan d'eau libre, et ceci jusqu'à 25-27 mm/j. Au contraire avec le sol structuré le débit initial maximum observé est de 15-7 mm/j, et il est nettement inférieur au débit du plan d'eau libre pour cet essai. Cela tient d'une part au fait que dans les tranches de sol superficielles, à pourcentage d'humidité égal, le sol < 1 mm, de densité apparente plus élevée, contient un volume d'eau plus important accessible à l'évaporation. Mais cette explication est insuffisante, car le rapport des débits initiaux (25,6/15,7) est plus élevé que le rapport des volumes d'eau disponible (1,25/1). Par conséquent la structure joue un rôle d'une autre façon, probablement par sa conductibilité, liée aux contacts des agrégats et à la continuité de la masse liquide. On peut penser que dans un sol agrégé, les filets liquides doivent passer d'un agrégat à l'autre par des points de contact plus rares qu'avec un sol tassé. Cette hypothèse reste à vérifier. Le chiffre de 19,6 mm/j du tableau 1 ne devrait pas ici être pris en considération, car la faible réserve en eau a probablement limité le débit initial. De plus on ne peut comparer rigoureusement les débits initiaux relatifs à une seule structure car ils n'ont pas été mesurés sur des intervalles de temps comparables. Comme le débit est décroissant avec le temps, les débits initiaux calculés sur des intervalles de temps courts sont relativement plus élevés que ceux calculés sur des intervalles de temps plus longs.

B. — INFLUENCE DE L'ÉTAT STRUCTURAL PENDANT LE STADE A ÉVAPORATION RAPIDEMENT DÉCROISSANTE (DEUXIÈME STADE)

Lorsque le sol est ressuyé au début de l'évaporation, c'est-à-dire que son humidité à presque tous les niveaux est voisine de la capacité de rétention, le débit d'évaporation va immédiatement en décroissant. Lorsqu'on exprime le débit q mm/j en fonction de la quantité totale d'eau évaporée e mm, on obtient sensiblement une droite à pente négative plus ou moins forte. Puis on observe un changement de pente et le débit décroît plus lentement, ce qui caractérise le troisième stade. Mais lorsque le régime d'évaporation passe du deuxième stade au troisième stade, la transition n'est pas toujours très nette, et il est difficile de dire si on est en présence de deux phénomènes différents consécutifs, ou d'un seul phénomène à allure non linéaire. On peut néanmoins, dans la représentation considérée, apprécier à 1 ou 2 mm près la zone de transition, c'est-à-dire la quantité d'eau perdue par le sol en régime d'évaporation rapidement décroissant : cette évaluation n'est pas sans intérêt car elle indique la quantité d'eau qu'un sol nu ressuyé peut perdre assez rapidement par évaporation. Le tableau suivant regroupe quelques résultats relatifs aux deux états structuraux et à différentes réserves initiales et conditions d'évaporation potentielle. Lorsque, dans une comparaison, la transition du deuxième au troisième stade n'est pas

nette, nous avons pris la perte totale *e* mm lorsque le débit tombe au-dessous d'une même valeur, généralement 1 mm/j.

Nous constatons dès l'abord que la perte d'eau entraînant une réduction très nette du débit d'évaporation n'est pas constante pour un sol donné. Pour nos essais elle peut varier de 19 à 40 mm, c'est-à-dire du simple au double. Le fait que nous ayons deux facteurs (réserve et EP) qui varient simultanément ne permet pas d'établir une relation sûre entre la perte d'eau et l'un ou l'autre des facteurs.

TABLEAU 2

Influence de l'état structural sur la perte d'eau (mm) au cours du 2e stade
(En relation avec la réserve initiale, le pouvoir évaporant de l'air)

	1	2	3	4	5	6
Réserve initiale (mm)	32	50	50	60	60	200
Pouvoir évaporant de l'air mm/j EP	2 à 4	2 à 5	5 à 10	1 à 3	27	25
Eau mm perdue par le sol :						
Structuré 5 à 10 mm	22	20	22	25	30	32
Fin < 1 mm	21	19	21	26	33	60 (1) (40)

Cependant si on compare par couples certains résultats, on peut penser qu'il y a probablement un effet distinct de chacun des facteurs. En effet dans la première et la quatrième colonne la différence provient exclusivement de la réserve initiale (32 et 60 mm) pour une EP très voisine : la perte d'eau au cours du deuxième stade est plus importante avec les réserves les plus élevées. Il y aurait là un effet de la réserve, mais qui ne se fait plus sentir au-dessus de 60 mm, si on compare la colonne 5 et la colonne 6 où, pour des EP voisines et des réserves très différentes, les pertes d'eau sont assez voisines.

L'effet des conditions climatiques EP existe très certainement aussi, si on compare notamment les colonnes 4 et 5 où pour la même réserve et des EP très différentes (1-3 et 27 mm/j) les pertes sont nettement différentes (25 et 30 mm, 26 et 33 mm). Cela est lié au débit initial dont il a été question précédemment. On pourrait donc conclure provisoirement que :

a) Plus la réserve est faible et moins le sol doit évaporer pour arriver à un faible débit résiduel. Il y aurait là comme un système de compensation.

b) Plus le climat est évaporant, plus le sol perd d'eau avant d'arriver au faible débit résiduel.

Si on examine *l'effet de la structure*, on voit qu'il est quasiment inexistant pour les faibles réserves ou les faibles EP. Par contre, pour les EP élevées, il semble que la perte d'eau au cours du deuxième stade est plus faible pour le sol agrégé que pour le sol tassé (< 1 mm). Mais il faut voir là plutôt une indication qu'un résultat sûr.

Si l'état structural ne semble pas intervenir sur la quantité d'eau perdue au

(1) 60 mm comprennent dans ce cas 20 mm perdus en cours de premier stade. La perte attribuable au deuxième stade est donc 40 mm.

cours du 2e stade, il joue sur la répartition de l'eau dans le profil. En premier lieu, comme on le voit sur la figure 3, la répartition initiale de l'eau est variable suivant l'état structural, comme nous l'avons déjà montré par ailleurs (A. FÉODOROFF, 1961) : avec le sol agrégé, la répartition est plus constante sur toute la tranche de sol humectée, et la profondeur humectée est plus grande qu'avec le sol fin tassé, ce qui est une conséquence de la différence des densités apparentes. Au cours de l'évaporation, le sol agrégé s'assèche plus en surface, alors que la contribution des couches profondes est plus faible. Avec la terre fine, c'est l'inverse qu'on observe, le taux

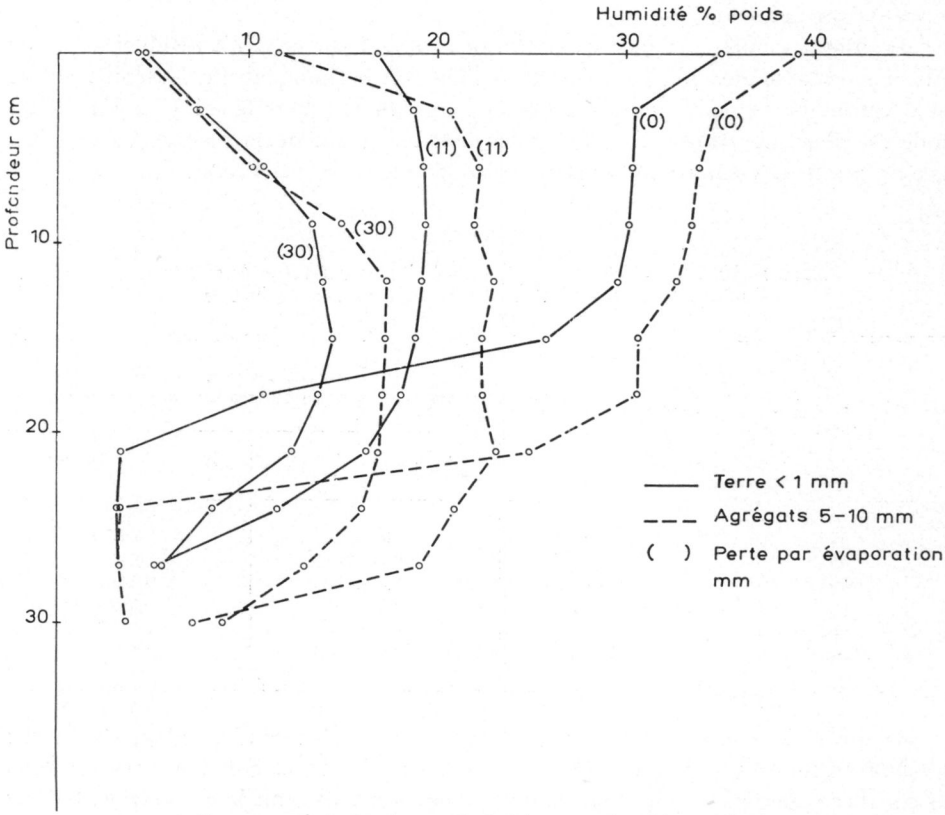


FIG 4. — *Évolution des profils hydriques pendant l'évaporation* (EP 1 à 3 mm/j)

d'humidité baissant assez considérablement au-dessous de 10 cm de profondeur. Il ne faut cependant pas y voir un effet exclusif de la remontée de la masse liquide vers la surface évaporante, une certaine migration vers le bas persiste : le front d'eau visible à progressé *per descensum* de 1,5 cm, pendant que l'évaporation conduisait en 24 h à une perte de 25 mm.

A cet égard le système du sol agrégé serait plus favorable pour l'alimentation en eau d'un végétal dont les racines sont déjà installées à une certaine profondeur. Néanmoins, les différences en fonction de l'état structural dans la distribution de l'eau après une perte égale par évaporation sont beaucoup moins nettes lorsque le climat est peu évaporant (EP faible) (fig. 4).

C. — Influence de l'état structural sur le débit résiduel d'évaporation (3e stade)

Nous avons vu que si la transition entre le deuxième et le troisième stade n'est pas toujours très précise, l'existence même du troisième stade à très faible débit d'évaporation (généralement inférieur à 1 mm/j dans les conditions de nos expériences) apparaît nettement dans tous nos essais. Ce troisième stade conduit lentement à l'épuisement complet de toute la réserve, bien entendu si le système est à l'abri de nouvelles précipitations.

Le rôle des différents facteurs qui interviennent sur ce débit résiduel apparaît dans une certaine mesure dans le tableau 3. On voit notamment que le débit résiduel est d'autant plus grand que la quantité d'eau présente dans le sol au début de ce stade est plus importante, ce qui dépend essentiellement de la réserve en eau initiale du profil. Les conditions climatiques ne semblent pas intervenir.

TABLEAU 3

Débit résiduel du 3e stade (mm/j), en relation avec l'état de la structure, les conditions d'évaporation potentielle et la réserve initiale

Réserve initiale (mm)	Évaporation potentielle (mm/j)	Débit au 3e stade (mm/j) après une perte de 10 mm au cours de ce stade	
		Agrégats < 1 mm	Agrégats 5-10 mm
32	2-4	0,10	0,15
50	2-5	0,3-0,4	0,4
50	5-10	0,3-0,4	0,4-0,5
60	1-3	0,3-0,4	0,3-0,4
60	27	0,6	0,5-0,6
212-200	25-27	0,9-1,0	0,9-1,0

D'après ces essais, l'effet de la structure sur le débit résiduel n'apparaît pas : il est probable qu'à ce stade l'état de tassement du sol (qui est d'ailleurs sec dans les couches superficielles) ne soit pas un facteur limitant pour la circulation de l'air chargé d'humidité. Il n'est cependant pas exclu qu'avec un tassement plus important, c'est-à-dire une porosité totale plus réduite (ici elle est de l'ordre de 55 p. 100 en volume pour le sol sec < 1 mm), celle-ci ne devienne un facteur limitant pour le transfert de la vapeur, et par conséquent le débit d'évaporation du troisième stade.

D. — Effet global de l'état structural sur l'évaporation cumulée a chaque instant

Après avoir analysé le comportement à l'évaporation de deux états structuraux au cours des différents stades, nous comparerons ici pour chaque essai la perte totale à chaque instant suivant l'état structural, toutes autres choses étant égales par ailleurs. L'ensemble est regroupé dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Bilan de l'évaporation suivant l'état structural.
Pertes cumulées en mm

N° essai	Réserve initiale (mm)	EP mm/j	Jours	2/3	2	4	6	11	20	29	37	46	57	71
1	60	1 à 3	Agrégats fins < 1 mm	2	3,5	5,5	9,2	17	25,6	31	35,2	37,8	42	45
			Agrégats grossiers 5-10 mm	2,5	6	8	12,5	18	25	30	34	37	41	44
2	60	27	Agrégats fins < 1 mm	13,5	19,5	23,5	28	32	38	42	47	51	55,7	60,3
			Agrégats grossiers 5-10 mm	9,5	14,6	20	25	30	35	40	45	50	55	60
			Différence	4	4,9	3,5	3	2	3	2	2	1	0,7	0,3

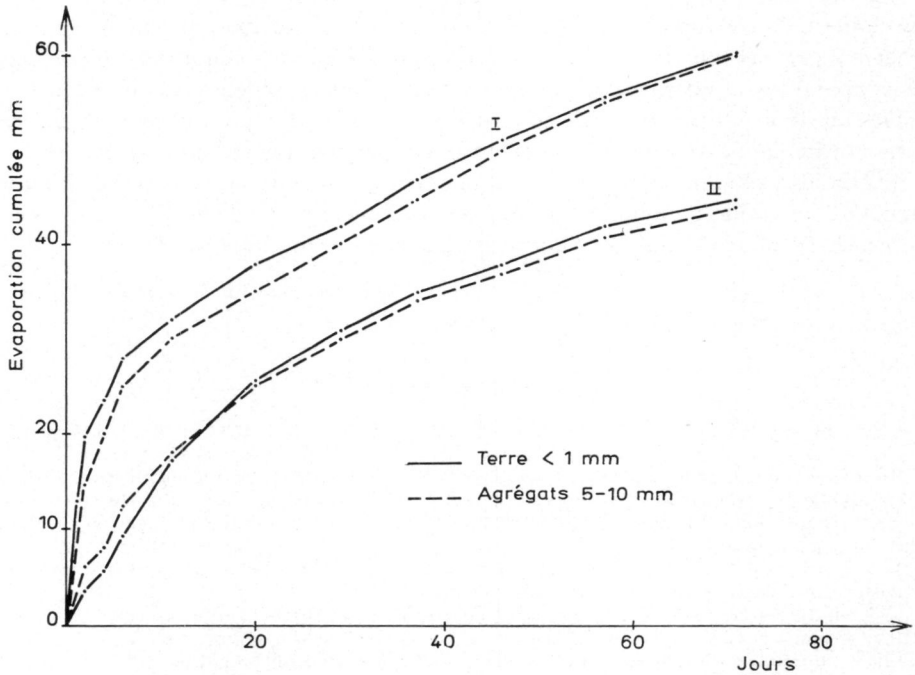


FIG. 5. — *Évaporation cumulée pour deux états structuraux et deux conditions climatiques*
Courbe I : EP = 27 mm/j
Courbe II : EP 1 à 3 mm/j

En évaporation potentielle faible, les agrégats évaporent plus au début de l'essai, ce qui est une conséquence de leur débit initial plus élevé. Cependant à chaque instant la différence ne dépasse pas 3,5 mm, puis elle devient nulle et s'inverse même, sans que probablement cela soit significatif.

En évaporation potentielle élevée on observe au contraire une perte d'eau plus importante avec le sol non agrégé. Avec la réserve initiale de 60 mm, cette différence est de l'ordre de 5 mm après deux jours d'évaporation, puis va en s'atténuant. Avec les réserves initiales élevées (de l'ordre de 200 mm) la différence est plus grande encore, par conséquent dans un climat évaporant, la perte à chaque instant est plus forte pour le sol tassé que pour le sol agrégé (fig. 5).

CONCLUSIONS

Les études au laboratoire ont montré que lorsque l'eau suspendue s'évapore d'un sol nu, l'état structural peut exercer une certaine influence. Cet effet est dépendant des autres facteurs de l'évaporation, notamment les conditions climatiques. Le résultat le plus net est que le débit d'évaporation initial, correspondant à un sol ressuyé, est le plus élevé pour le sol agrégé lorsque le climat est peu évaporant, et le plus élevé pour le sol tassé lorsque le climat est fortement évaporant.

Ces comportements de laboratoire se rapprochent de certains comportements au champ : une terre labourée au printemps « blanchit » ou « fleurit », c'est-à-dire que ses couches placées en contact avec l'atmosphère se dessèchent et leur couleur devient plus claire. Cela correspond à nos résultats en milieu peu évaporant. Quant au comportement plus « économiseur » de la structure agrégée dans des conditions climatiques très évaporantes, il est invoqué par les praticiens qui procèdent aux techniques de binages ou de dry-farming. Dans nos essais, l'économie due au seul effet structural est de l'ordre de 5 à 10 mm dans le début d'une période d'évaporation sans pluie.

Enfin les techniques qui permettent une bonne infiltration de l'eau et évitent sa stagnation en surface conduisent à une économie certaine de l'eau. C'est là un effet indirect de l'état structural qui n'est peut-être pas le moins important.

Reçu pour publication en février 1963.

SUMMARY

THE EVAPORATION OF WATER FROM BARE SOIL. THE EFFECT OF STRUCTURAL CONDITION

In a bare soil containing suspended water, that is in soil reposing on a drier substrate, evaporation proceeds in three consecutive stages : there is first a constant flow as long as the soil is saturated with water, followed by a rapidly decreasing flow as soon as the soil is dry and, in the third stage, by a weak residual flow which decreases very slowly and may, when there is a prolonged absence of rain, result in excessive drying of the deep horizons or even in a complete exhaustion of moisture reserves at least under laboratory conditions.

A laboratory study undertaken on 1 mm and 5-10 mm aggregates of a loamy-clay soil showed that the structural condition has a marked effect during the first stage of evaporation only. Under climatic conditions in which evaporation is low, a well-aggregated soil would have a high evaporation, and *vice versa*.There always exists a difference between the total loss by evaporation on non-aggregated and well-aggregated bare soil ; this difference, under the conditions of the present experiment, amounts to maximum 5-10 mm and tends to decrease with time.

ZUSAMMENFASSUNG

WASSERVERDUNSTUNG AUS NACKTEM BODEN. ROLLE DES STRUKTURZUSTANDES

In einem nackten, suspendiertes Wasser enthaltenden Boden, d.h. auf trockenem Substrat ruhend, vollzieht sich die Verdunstung nach drei aufeinanderfolgenden Phasen : ein erstes Stadium mit konstanter Wasserabgabe solange der Boden mit Wasser getränkt ist, ein zweites Stadium mit rasch abnehmender Abgade von dem Augenblick an, da der Boden abtrocknet, und ein drittes Stadium mit schwacher Residualabgade, sehr langsam abnehmend, welches bei längerer, regenloser Periode zu einer ausgesprochenen Austorcknung der tiefen Bodenschichten führt und auf die Dauer die Reserven total erschöpft, wenigstens unter Laboratoriumsbedingungen.

Der Einfluss des Strukturzustandes, im Labor auf 1 mm und 5-10 mm grosse Bodenaggregate eines Tonlehms untersucht, ist nur im Anfangsstadium der Verdunstung deutlich. In einem schwachen Austrocknungsklima verdunstet der Aggregatboden etwas mehr, in starkem Verdunstungsklima hingegen weniger. Zu jedem Augenblick besteht also ein Unterschied zwischen Totalverlust durch Verdunstung des nackten, gesetsten und des gefügten Bodens. In unsern Versuchsbedingungen beträgt der Unterschied höchstens 5-10 mm Wasser und nimmt mit der Zeit stets ab.

РЕЗЮМЕ

Испарение влаги голой почвой. Роль структурного сложения.

А. ФЕОДОРОВ и М. РАФИ (Версаль)

В голой почве, содержащей подвешенную влагу, то-есть находящуюся над слоем более сухой почвы, испарение проходит через три последовательные стадии : первая — стадия постоянного расхода влаги, пока почва находится в состоянии избыточного увлажнения, вторая — стадия быстрого уменьшения этого расхода, начиная с момента когда избыток влаги израсходован, и, третья — со слабым, медленно уменьшающимся остаточным расходом, приводящая, при долгом отсутствии дождей, к ярко выраженному высыханию глубинных слоев почвы и, могущая вызвать даже полное исчерпание запасов влаги, особенно в лабораторных условиях.

Влияние структурного сложения, изучавшееся в лаборатории на суглинистых агрегатах менее 1-го мм и от 5-10 мм, бывает явным только во время начальной стадии испарения. При мало испаряющем климате комковатая почва испаряет больше, а при климате сильно испаряющем — меньше. Значит, в любое время, существует разница в общей потере влаги вызванной испарением, между голой почвой и почвой комковатой. В условиях проведенных опытов разница эта достигает максимальной величины в 5-10 мм влаги и уменьшается со временем.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUROV D. I., 1952. Évaporation de l'eau par le sol nu et par le sol sous végétation dans les régions transvolgiennes. *Pochvovedenie*, nº 1, 41-52.

FEODOROFF A., 1961. Influence de l'état structural sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. *C. R. Ac. Agr.*, **47**, nº 4, 164-165.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962 *a*. Évaporation de l'eau à partir du sol nu. I — Les trois stades de l'évaporation. *C. R. Ac. Sc.*, **225**, 3220-22.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962 *b*. Évaporation de l'eau à partir du sol nu. II — Évolution des profils hydriques. *C. R. Ac. Sci*, **225**, 3468-70.

HOLMES J. W. et *al.*, 1960. The evaporation of water from bare soils with different tilth. *Trans. 7 th. Int. Congr., Soil Csi*, **1**, 14.

RAFI M., 1962. Contribution à l'étude de l'évaporation du sol nu. Thèse 3e Cycle. Paris. Ronéotypé.

Ann. agron., 1963, **14** (4), 615-618.

CALCUL GRAPHIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

SELON LES FORMULES DE R. J. BOUCHET ET L. TURC

E. LOCOSTE

Ecole nationale d'Agriculture, Maison Carrée, Algérie

A des échelles différentes (jour et mois), les formules de R. J. BOUCHET et de L. TURC permettent d'évaluer l'évapotranspiration potentielle, notion qui devrait conduire à une économie d'eau d'irrigation et à une augmentation des productions végétales.

Ces relations sont calculables graphiquement (par abaques à points alignés) avantage certain lors d'études statistiques.

Les abaques présentés sont à points alignés, à échelles rectilignes métriques et fonctionnelles, disposées en N ou en V.

ABAQUE POUR LA FORMULE DE R. J. BOUCHET

$$\mathrm{ETP} = \alpha \cdot [1 + \lambda(\theta)] \cdot E_p$$

(ETP, E_p mm/jour — α coefficient $\neq$ 0,37 — θ°C)

$$\mathrm{ETP} = \rho \cdot E_p \qquad (1)$$

$$\rho = \alpha \cdot [1 + \lambda(\theta)] \qquad (2)$$

(1) et (2) sont de la forme $F_1 \cdot \varphi_3 + F_2 = 0$; expression canonique des abaques en N. [1]

Deux nomogrammes en N, associés par l'échelle ρ permettent de déterminer ou ETP ou α observé (ETP mesuré/$[1 + \lambda(\theta)] \cdot E_p$), par double alignement (Δ_1, Δ_2) concourant au point pivot ρ.

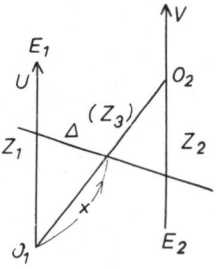
[1]

$$u = \mu_1 F(z_1)$$
$$v = \mu_2 F(z_2)$$
$$x = a. \frac{\mu_2}{1 + \mu_2 \varphi(z_3)}$$
$$o_1\ o_2 = a$$

Les modules (longueur en mm pour une unité de la fonction) μ_1, μ_2 et les origines des échelles E_1, E_2 sont arbitraires.

Toute droite Δ qui coupe les trois échelles, détermine trois valeurs particulières des variables qui satisfont la relation $F_1 \cdot \varphi_3 + F_2 = 0$

Seule sujétion, le tracé sur support insensible aux variations climatiques.



L'échelle $20 \geqslant \theta \geqslant 30$ est décalée pour réduire l'encombrement sans nuire à la précision (l'intervalle graphique minimum est de 1 mm pour 0,2°C).

L'échelle ρ, en principe réduite à un axe, est complétée par une graduation repère.

Emploi de l'abaque (Schéma 1)

L'alignement Δ_1 (θ-α) fixe le point pivot, ρ repéré par un trait fin ou une lecture. La droite Δ_2 (ρ-E_p) détermine ETP.

Inversement le double alignement ETP mesuré-E_p-ρ-θ donne α observé.

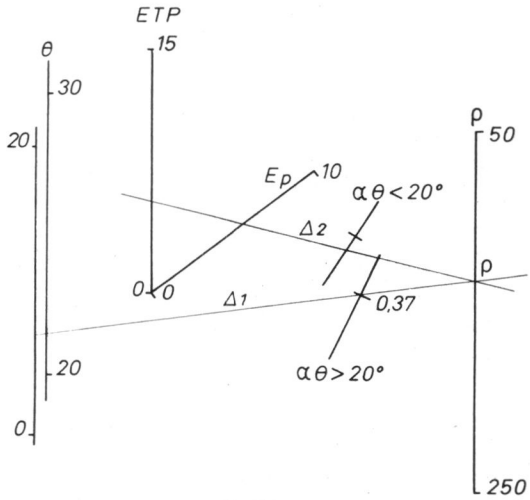


Schéma 1

ABAQUE POUR LA FORMULE DE L. TURC

$$\mathrm{ETP} = 0{,}4 \cdot \frac{t}{t+15} \cdot (\mathrm{I}_g + 50) \cdot \left(1 + \frac{50 - h_r}{70}\right)$$

(0,37 pour février)

$$\mathrm{I}_g = \mathrm{I}_{g_A} \cdot \left(0{,}18 + 0{,}62 \frac{h}{\mathrm{H}}\right)$$

(ETP mm/mois—t°C— I_g, cal./cm²/jour ; h_r p. 100—h, H heures/mois)

$$\mathrm{ETP} = 0{,}4 \cdot \frac{t}{t+15} \cdot (\mathrm{I}g + 50) + \mathrm{C}$$

$$\mathrm{C} = 0{,}4 \cdot \frac{t}{t+15} \cdot (\mathrm{I}g + 50) \cdot \frac{(50 - hr)}{70}$$

(c mm/mois — $c = 0$ pour $h_r \leqslant 50$ p. 100)

$$\mathrm{I}_g = \mathrm{I}_{g_A} \cdot \rho \qquad (2)$$

$$\rho = \left(0{,}18 + 0{,}62 \frac{h}{\mathrm{H}}\right)$$

$$\left(\frac{\rho - 0{,}18}{0{,}62}\right) \cdot \mathrm{H} = h \qquad (1)$$

(1) et (2) sont de la forme $\mathrm{F}_1\ \varphi_3 + \mathrm{F}_2 = 0$; expression canonique des abaques en N.

Deux nomogrammes en N, associés par l'échelle ρ permettent de calculer I_g

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-11-1963

Dépôt légal : 4e trimestre 1963. *N° d'impression : 1040.*

par double alignement (Δ_1, Δ_2) concourant au point pivot, ρ_1, aux conditions suivantes :

$$(\rho = 0) \qquad a_{(2)} = a_{(1)} \cdot \frac{0{,}62\ \mu_H}{0{,}62\ \mu_H - 0{,}18\ \mu_h}$$

$$(\rho \neq 0) \qquad \mu_h \cdot (\mu_{Ig_A} + 0{,}18\ \mu_{ig}) = 0{,}62\ \mu_H \cdot \mu_{Ig}$$

qui expriment que $x_{(1)} = x_{(2)}$ pour toutes les valeurs de ρ (pour l'abaque présenté $\mu_{ig} = \mu_{iga}$ d'où

$$a_{(2)} = 1{,}36\ a_{(1)} \text{ et } \mu_H = \left(\frac{136}{124}\mu_h\right)$$

$$\frac{t}{t + 15} = \frac{x}{0{,}4 \cdot (I_g + 50)} \tag{3}$$

relation entre les triangles semblables ($I_g + 50$)—($t + 15$) — Δ_3 et ETP—t—Δ_3.

$$c = x \cdot \left(\frac{50 - h_r}{70}\right) \tag{4}$$

expression représentable par un abaque en N à simple alignement (Δ_3). Le calcul séparé de cette correction permet d'en apprécier l'importance relative

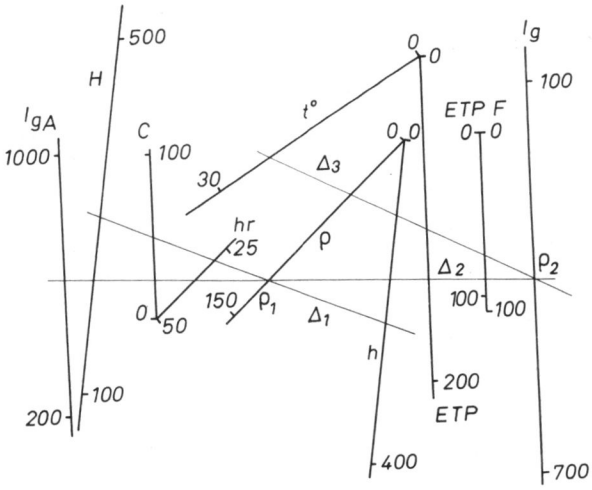
$$\text{ETP février} = \frac{37}{40}\ \text{ETP 30 j} \tag{5}$$

l'évapotranspiration potentielle pour février est lue sur l'échelle fév. au droit de ETP fournie par l'abaque (échelle accolées). C est calculée à partir de ETP février.

Emploi de l'abaque (schéma 2)

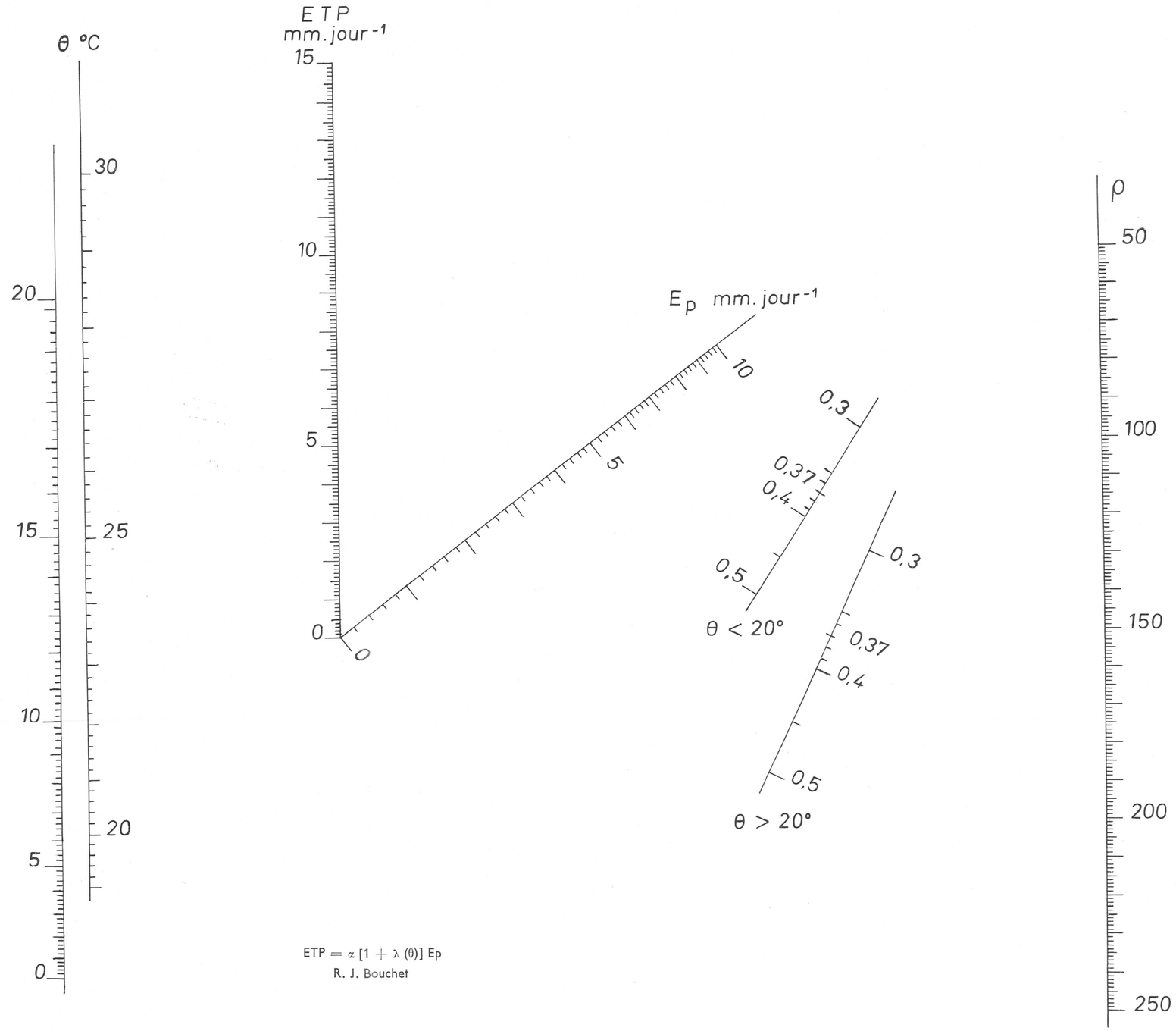
L'alignement Δ_1 (H-h) fixe le point pivot ρ_1 (repéré par un trait fin ou une lecture). La droite Δ_2 (I_{gA}-ρ_1) détermine I_g (trait ρ_2 ou lecture).

Δ_3 (I_g—t) et Δ_4 (ETP—h_r, non représenté) résolvent les formules (3) et (4).



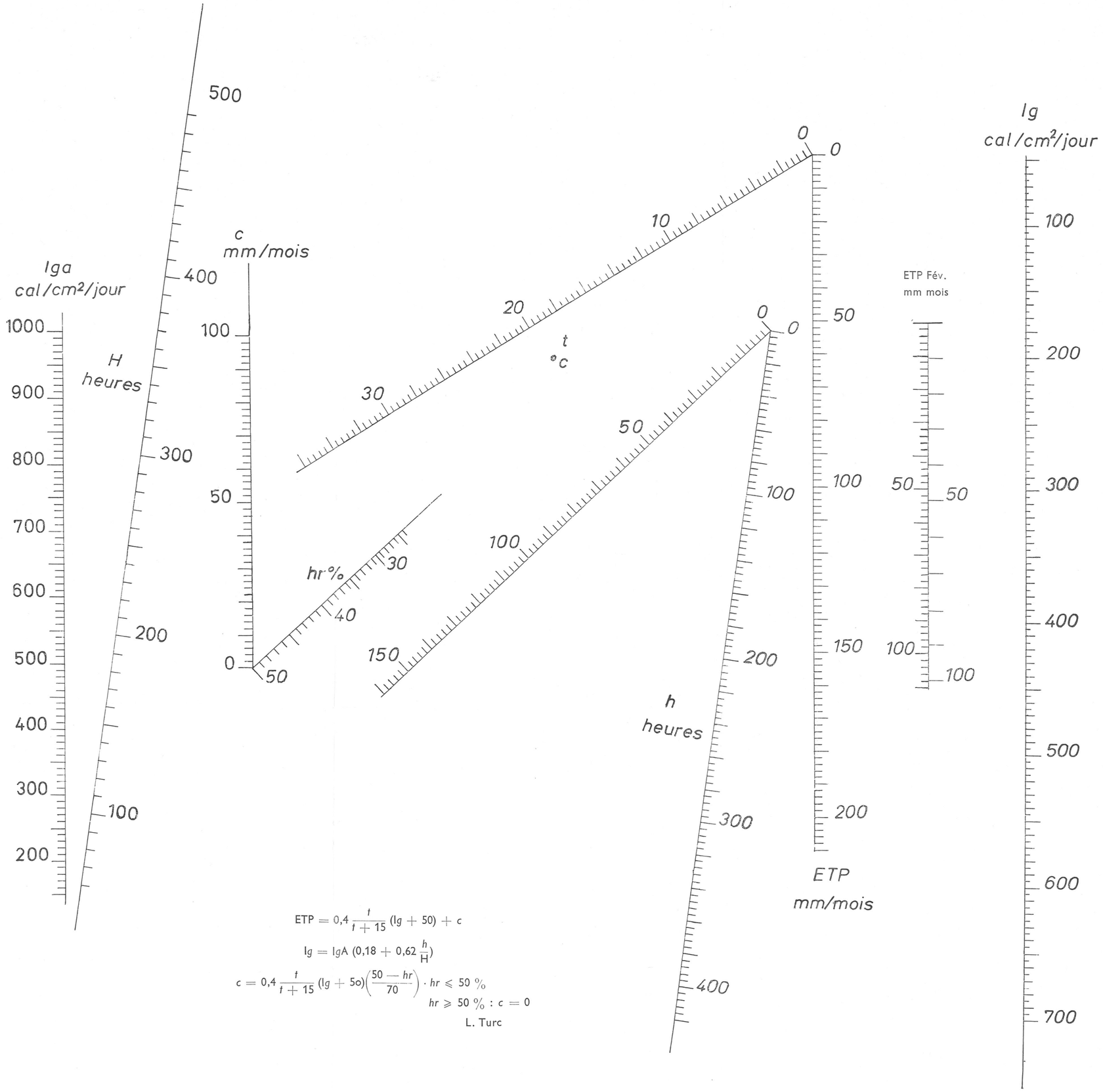
Scméma II

Reçu pour publication en mai 1963.



$ETP = \alpha\,[1 + \lambda(\theta)]\,Ep$

R. J. Bouchet



$$ETP = 0{,}4 \frac{t}{t+15} (Ig + 50) + c$$

$$Ig = IgA \left(0{,}18 + 0{,}62 \frac{h}{H}\right)$$

$$c = 0{,}4 \frac{t}{t+15} (Ig + 5o)\left(\frac{50 - hr}{70}\right) \cdot hr \leqslant 50\ \%$$

$$hr \geqslant 50\ \% : c = 0$$

L. Turc

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron., 1963, **14** (5), 619-653

RHIZOSPHÈRE ET CROISSANCE DU BLÉ

J. RIVIÈRE

Avec la collaboration technique de Bernadette BERTHIER

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Microbiologie,
Institut national agronomique, Paris

SOMMAIRE

Une étude approfondie des Bactéries isolées de la rhizosphère du Blé montre que la répartition des groupes nutritionnels ne présente pas de différence significative avec celle du sol éloigné ou témoin. Par contre, il y a une prédominance nette des bâtonnets Gram négatifs appartenant à plusieurs genres bien identifiés, tandis que le sol témoin contient une proportion importante de souches du genre *Bacillus*.

On trouve dans la rhizosphère un pourcentage assez élevé (19,9 p. 100) de Bactéries produisant des phytohormones décelées à l'aide de deux tests biologiques (croissance linéaire du coléoptile de Blé et élongation des plantules de Pois nains). Seul un certain nombre d'entre elles, soit 24 p. 100, dont les plus actives appartiennent au genre *Pseudomonas*, semblent responsables de modifications dans la croissance des racines du Blé, sous l'action de substances présentes dans le filtrat de leurs cultures. Dans ce cas, il pourrait s'agir d'acide indole-3-acétique dont la biosynthèse bactérienne se ferait à partir du tryptophane.

INTRODUCTION

Au cours de recherches antérieures (RIVIÈRE, 1960), il a été mis en évidence que les plantes, en l'occurence le Blé, déterminent au voisinage de leurs racines un phénomène particulier, l'effet rhizosphère, qui se manifeste par des modifications dans la microflore du sol, ce qui s'explique expérimentalement par l'action de leurs excrétions radicellaires.

On se pose maintenant la question de savoir si les microorganismes de la rhizosphère agissent sur la croissance des plantes au voisinage et sous l'action desquelles ils ont pu se développer. Est-il possible, par exemple, que chaque plante ait une rhizosphère typique, de telle sorte que la bactérisation des graines puisse hâter la

croissance et favoriser l'obtention de plantes vigoureuses, à l'image de ce qui se passe dans le cas des Légumineuses (OBATON et *al.*, 1959). Bien entendu, s'il s'agit de microbes phytopathogènes, la réponse est négative. Mais, comme le remarque justement STARKEY (1958) dans une récente mise au point, la plupart des microorganismes de la rhizosphère, sinon tous, sont des saprophytes, et il doit être intéressant de préciser leur rôle.

Dans un premier stade, tous les auteurs sont d'accord pour souligner le fait que cette microflore solubilise, en partie tout au moins, un certain nombre d'éléments minéraux. Une très belle expérience de GERRETSEN (1948) le démontre dans le cas du phosphore.

Plus tard, KATZNELSON et BOSE (1959) signalent que les Bactéries dissolvant les phosphates ne sont pas stimulées préférentiellement dans la rhizosphère, mais qu'elles peuvent contribuer à la nutrition phosphatée de la plante par leur grand nombre et par leur intense activité métabolique.

Enfin, vis-à-vis des substances nutritives du sol, lorsque l'on considère les plantes et les microorganismes de la rhizosphère, compétition ou association varient suivant les facteurs du milieu (NILSSON, 1957), jouant un grand rôle dans l'équilibre microbien au voisinage des racines. C'est ainsi, pour apprécier le type de relations entre les plantes et la microflore du sol, que LOCHHEAD (1952) a estimé indispensable d'étudier les besoins nutritionnels des Bactéries de la rhizosphère, et de les comparer à ceux des Bactéries du sol éloigné ou témoin. Afin de comprendre les conclusions auxquelles on a abouti, il est nécessaire de résumer rapidement la technique utilisée. Elle consiste à isoler toutes les colonies qui se sont développées à partir d'un échantillon dilué de sol éloigné ou de rhizosphère étalé sur un milieu gélosé à l'extrait de terre (il faut retenir au moins une centaine de colonies), puis à les ensemencer dans des milieux liquides de complexité croissante. On détermine alors les souches qui peuvent croître dans un milieu minéral de base contenant du glucose, puis celles qui nécessitent le même milieu additionné d'acides aminés, et enfin les dernières qui ont besoin des facteurs de croissance contenus dans l'extrait de levure et dans l'extrait de terre. Les auteurs utilisent même, assez souvent, d'autres milieux intermédiaires. De cette manière, LOCHHEAD et ROUATT (1955) démontrent qu'il a dans la rhizosphère d'un grand nombre de plantes, par rapport au sol éloigné, une stimulation préférentielle des Bactéries nécessitant des acides aminés, tandis que le pourcentage des Bactéries nécessitant des facteurs de croissance y est plus faible. Ces résultats peuvent s'expliquer, selon GIBSON (1957), par le fait que les racines excrètent des acides aminés, ce qui est prouvé par plusieurs chercheurs (KANDLER, 1951 ; KATZNELSON et *al.*, 1955 ; ROVIRA, 1956 ; NILSSON, 1957 ; RIVIÈRE, 1960).

En fait, COOK et LOCHHEAD (1959) mettent en évidence que les Bactéries capables de synthétiser des facteurs de croissance, comme celles qui excrètent des acides aminés (PAYNE et coll., 1957), sont toujours proportionnellement beaucoup plus nombreuses dans la rhizosphère. D'où l'idée qu'il y a aussi dans cette zone des interactions de microorganismes entre eux, ceux à pouvoir de synthèse élevé permettant la prolifération des autres (POCHON et de BARJAC, 1958). Malheureusement, d'autres auteurs ne sont pas d'accord (TAYLOR, 1951 ; WALLACE et KING, 1954 ; HOLDING, 1960). Il apparait donc nécessaire de revoir la question, car les critiques de LOCHHEAD et ROUATT (1955), invoquant des erreurs dans les contrôles des expériences faites en plein champ, ne sont pas satisfaisantes. Par la même occasion, il est intéressant

aussi d'essayer de rechercher si certains genres bactériens sont plus fréquemment rencontrés dans la rhizosphère, car il y a peu de faits précis relevés dans la bibliographie, si ce n'est qu'on signale presque toujours un accroissement général du nombre des bâtonnets Gram négatifs (ROVIRA, 1956 ; GYLLENBERG, 1957 ; SPERBER et ROVIRA, 1959 ; HOLDING, 1960 ; TARDIEUX et *al.*, 1961 ; ROUATT et KATZNELSON, 1961). Par contre, le sol éloigné est riche en Bactéries appartenant au genre *Bacillus* ou au genre *Arthrobacter* (CLARK, 1949 ; HOLDING, 1960). Il est d'ailleurs difficile de tenir compte de la plupart des conclusions un peu anciennes par suite du manque d'identification précise des Bactéries étudiées à l'époque.

De plus, on se demande si quelques-unes des Bactéries de la rhizosphère ne sont pas capables de synthétiser aussi des substances pouvant agir sur la croissance du Blé. En effet, il y a plus de vingt années, BEREZOVA (1938) avait prétendu que l'augmentation des rendements obtenus en U. R. S. S. après l'inoculation des semences avec des souches d'*Azotobacter* était due à l'excrétion bactérienne de facteurs de croissance.

Pour CHOLODNY (1951) des gaz d'origine microbienne induisent la croissance des racines, la production du chevelu radicellaire, et même des tropismes variés. On ne connaît malheureusement pas quelles sont les substances volatiles responsables. Suivant leur concentration, des filtrats de cultures variées de Bactéries, d'Actinomycètes ou de Champignons peuvent stimuler ou inhiber le développement normal des racines ou des poils absorbants (STILLE, 1957 ; TOLLE et RIPPEL-BALDES, 1958). Cependant, la plupart des recherches se sont effectuées avec des souches d'*Azotobacter*, aboutissant à déceler dans les filtrats de la culture de cette Bactérie, non seulement de l'acide indole-3-acétique (SMALII et BERSHOVA, 1957 ; BURGER et BUKATSCH, 1958 ; POCHON et BARJAC, 1958 ; BELTRA, 1959 ; VANCURA et MACURA, 1960), mais aussi de l'acide gibberellique (VANCURA, 1961).

Or, nous n'avons jamais trouvé de grandes quantités d'*Azotobacter* dans la rhizosphère du Blé, même au moment du tallage (RIVIÈRE, 1960). Au plus, nous en avons dénombré quelques dizaines de milliers par gramme de terre (en poids sec), alors qu'il y a des centaines de millions d'autres Bactéries. Malheureusement, celles-ci, les plus nombreuses, n'ont pas fait l'objet d'une étude systématique. On sait pourtant que quelques souches de collection, toujours les mêmes, produisent, dans des conditions déterminées, de l'acide indole-3-acétique (STOWE, 1955 ; AKHROMEIKO et SHESTAKOVA, 1957), selon divers mécanismes (STOWE, 1954 ; KAPER et VELDSTRA, 1958). SWABY (1942), puis BOWEN et ROVIRA (1961) ont étudié l'effet global d'une suspension de microorganismes ou de terre ajoutée dans des cultures aseptiques de diverses plantes. Dans ce cas, la croissance des racines et du chevelu radicellaire est modifiée, mais on ne sait pas à quelles Bactéries attribuer cette action. D'après PANTOS (1956), huit souches isolées de la rhizosphère du Blé exercent une action stimulante sur la croissance de cette plante cultivée auparavant aseptiquement dans du sable. L'une d'elle, *Agrobacterium radiobacter*, augmente la croissance d'environ 65 p. 100 par rapport à un témoin non inoculé.

Il apparaît aussi que des microorganismes de la rhizosphère sont capables de modifier la morphologie et le développement des racines (LEVISOHN, 1952). Quoique la présence d'acide indole-3-acétique puisse être invoquée dans certains cas, on ne peut pas toujours déterminer les substances microbiennes en cause (EKDALH, 1953 ; BARNES et NAYLOR, 1959). Parmi celles-ci, AKHROMEIKO et SHESTAKOVA (1957) ont mis en évidence des vitamines, des auxines, et des acides

aminés. Récemment, ROVIRA et BOWEN (1960) ont indiqué que la croissance des racines et des poils absorbants du Trèfle cultivé dans du sable imprégné ou dans un milieu gélosé est retardée en présence d'une microflore rhizosphérique.

On sait également qu'une souche de *Bacillus megaterium* ensemencée en même temps est capable de provoquer la prolifération in vitro de tissus végétaux, cambium dormant de *Vitis rupestris* (FALLOT, 1958) ou tubercules de Topinambours (FALLOT, 1960). Le facteur de prolifération se trouve dans l'extrait éthéré des filtrats (FALLOT, 1959).

Toutes ces raisons nous ont amené à effectuer une étude complète et systématique des Bactéries de la rhizosphère du Blé var. *fylgia*, au moment du tallage, quand l'effet rhizosphère est le plus élevé (RIVIÈRE, 1960). Ce travail a donc pour but d'une part d'étudier la répartition des genres et des groupes nutritionnels bactériens dans le sol éloigné et dans la rhizosphère, et d'autre part de rechercher parmi les Bactéries isolées celles qui sont capables de produire des phytohormones, en se servant de tests biologiques judicieusement choisis. Si c'est possible, on essaiera de caractériser ces dernières substances.

MATÉRIEL ET TECHNIQUES

1. — ISOLEMENT DES SOUCHES

Nous avons utilisé une terre de jachère dont nous connaissions les caractéristiques physiques, chimiques et bactériologiques (RIVIÈRE, 1960). L'expérimentation a été faite avec un Blé de printemps var. *fylgia* dont les grains, après avoir commencé à germer sur une feuille de papier-filtre humidifié pendant 48 heures à 25°C, sont semés à raison de trois grains par pot. Ce sont des pots métalliques du modèle courant employé à la Station centrale d'Agronomie (C. N. R. A., Versailles) et contenant environ 10 kg de terre tamisée et homogénéisée. Des pots non ensemencés servent de témoins. L'humidité est maintenue égale dans les différents pots au cours de la culture qui se fait sur une terrasse bien exposée. Au moment du tallage, un peu avant la montée, on prélève les échantillons.

a — *Rhizosphère*

On enlève les plantes avec précaution pour conserver tout le chevelu radicellaire en décollant au préalable le bloc de terre à l'aide d'une spatule. Après avoir émietté soigneusement ce bloc compact, les racines sont secouées pour les débarrasser de la terre qu'elles retiennent par adhérence, puis introduites dans une fiole d'Erlenmeyer contenant 100 ml de la solution de RINGER. On les agite quinze minutes dans un Microid Flask Shaker (Griffin and Georges Ltd, London). On obtient alors une dilution de la rhizosphère que l'on calcule après avoir fait l'extrait sec à 100°C sur une partie aliquote.

b — *Sol éloigné ou témoin*

Dix grammes de terre prélevés dans un pot témoin après homogénéisation du contenu subissent le même traitement.

L'isolement des souches se fait en ensemençant deux gouttes [1] de la dilution convenable des suspensions initiales à la surface de plaques de gélose à l'extrait de terre enrichie en phosphate bipotassique (0,02 p. 100), à raison de cinq plaques par dilution.

Après quatorze jours d'incubation à 28°C, toutes les colonies possibles sont prélevées (plusieurs centaines par essai) et repiquées dans une gélose molle à l'extrait de terre additionné de 0,02 p. 100 de phosphate bipotassique, de 0,01 p. 100 d'extrait de levure DIFCO, et de 0,3 p. 100 de gélose

[1] On utilise une pipette compte-gouttes donnant 20 gouttes par ml.

Noble DIFCO. Chaque souche est alors purifiée par de nombreux passages sur une gélose inclinée contenant 15 g de gélose Noble DIFCO, 0,5 g d'extrait de levure DIFCO, 2 g de Bacto-tryptone DIFCO, 0,5 g de phosphate monopotassique, 0,5 g de phosphate bipotassique, et 2 g de glucose pour un litre d'extrait de terre. On ensemence alors toutes les cultures pures obtenues dans trois milieux de complexité croissante, permettant de répartir les Bactéries isolées dans trois groupes nutritionnels, puis dans les divers milieux d'identification, et l'on recherche enfin celles qui sont capables de produire des phytohormones dans des conditions expérimentales déterminées.

2. — MILIEUX CARACTÉRISANT LES GROUPES NUTRITIONNELS

On utilise les milieux décrits par LOCHHEAD (1952) qui donnent la possibilité de distinguer les Bactéries se développant dans un milieu de base, où la source d'azote est minérale, de celles qui nécessitent des acides aminés, et des plus exigeantes qui ont besoin d'un ou de plusieurs facteurs de croissance contenus dans l'extrait de levure et dans l'extrait de terre.

a — *Milieu minéral de base (Milieu B)*

Il contient les substances suivantes :

K_2HPO_4 : 1 g ; KNO_3 : 0,5 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,2 g ; $CaCl_2$, $2H_2O$: 0,1 g ; NaCl : 0,1 g ; $FeCl_3$: 0,01 g, dans 1 litre d'eau distillée. Le pH est ajusté à 6,8 avec de la soude normale. Après 20 minutes de stérilisation à 120°C, on y ajoute 1 g de glucose stérilisé par filtration.

b — *Milieu contenant des acides aminés (milieu A)*

A un litre de milieu de base, on incorpore 4 g d'hydrolysat de caséine dépourvu de vitamines DIFCO.

c — *Milieu contenant de l'extrait de levure et de l'extrait de terre (milieu YS)*

Dans 750 ml de milieu de base, on met 250 ml d'extrait de terre et 1 g d'extrait de levure DIFCO.

Tous ces milieux sont répartis à raison de 5 ml par tube de 18 × 180 mm, stérilisés, ensemencés, et incubés durant cinq jours à 28°C. La croissance de chaque souche est mesurée par turbidimétrie. Dans l'interprétation des résultats, on ne tient compte que des croissances au moins égales à la moitié de la croissance maximale obtenue dans le milieu le plus complexe (milieu YS).

3. — IDENTIFICATION DES SOUCHES

La classification des souches isolées dans leurs genres respectifs est un problème complexe qui fait intervenir de nombreuses subcultures dans des milieux d'identification, incubées et examinées comme suit, afin de déterminer divers caractères plus ou moins spécifiques.

a — *Caractères morphologiques et culturaux*

Gélose nutritive inclinée et bouillon nutritif.

Dans le premier cas il est indispensable d'utiliser de la gélose très pure (gélose Noble DIFCO), sinon plus de la moitié des souches isolées se développent avec difficultés. Quelquefois ces deux milieux doivent être enrichis avec de l'extrait de terre pour qu'ils donnent lieu à une croissance normale. On note alors les caractères culturaux et on effectue les examens microscopiques (état frais, coloration de Gram et acido-résistance) après douze, vingt-quatre, quarante-huit et soixante-douze heures à 28°C. L'emploi du microscope électronique est nécessaire pour déterminer la présence et la disposition des flagelles des germes mobiles d'une culture jeune (en général après douze heures d'incubation à 28°C dans du bouillon nutritif).

Pigmentation.

Les pigments fluorescents solubles sont détectés en lumière ultraviolette après culture dans le milieu de KING (1954). La production de pigments jaunes par les Bactéries du genre *Flavobacterium* est considérablement augmentée si la gélose nutritive est additionnée de lait écrémé (SHEWAN et *al.*, 1960).

Motilité.

On examine au contraste de phase une suspension dans la solution de RINGER d'une culture de 18 heures à 28°C dans la gélose molle en culot après avoir détecté auparavant les caractères culturaux liés à la motilité.

Pomme de terre.

La culture est examinée après quatre, huit et quatorze jours d'incubation à 28°C.

Gélatine.

On emploie une solution à 15 p. 100 (poids/volume) de gélatine dans du bouillon nutritif. Les cultures sont incubées à 20°C et les résultats notés après quatorze et vingt-huit jours (degré et apparence de la liquéfaction).

Gélose au mannitol et au glycérophosphate de chaux (HOFER, 1941).

Elle permet de caractériser les souches appartenant au genre *Agrobacterium* qui donnent des colonies entourées d'un halo brun.

Milieu sucré, glycérophosphaté, au jus de choucroute (SPERBER et ROVIRA, 1959).

Il contient : saccharose: 10 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,3 g ; NaCl : 0,2 g ; KCl : 0,1 g ; glycérophosphate de chaux : 1 g ; NH_4NO_3 : 0,25 g ; citrate de fer à 6 p. 100 : 0,5 ml ; jus de choucroute : 20 ml pour un litre d'eau distillée. Dans ce milieu, les Actinomycétales sont fréquemment ramifiés après 24 à 48 heures d'incubation à 28°C.

Gélose molle à l'extrait de terre.

On l'ensemence par piqûre centrale, et on y détermine la vitalité des souches par subcultures après incubation à 15°C pendant trente à soixante jours, ainsi que les modalités de la sporulation si elle a lieu. Ce milieu sert aussi à contrôler les caractères morphologiques des diverses souches.

b. *Caractères physiologiques*

Températures cardinales de croissance.

On détermine les caractéristiques de la croissance dans le bouillon nutritif (par turbidimètrie) à 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 37°C et 42°C, températures obtenues à l'aide d'un bain-marie thermostatique ± 0,1°C.

Besoins en oxygène.

On les évalue par l'aspect de la culture dans de la gélose VF glucosée de PRÉVOT après vingt-quatre heures et quarante-huit d'incubation à 28°C.

Oxydation-fermentation du glucose.

On emploie le milieu mis au point par HUGH et LEIFSON (1953) qui permet de différencier les Bactéries capables d'oxyder le glucose de celles qui le fermentent, ou qui n'ont aucune action. C'est une gélose molle riche en glucose (10 g) et pauvre en peptones (1 g) que l'on ensemence en culot par piqûre centrale, à raison de deux tubes par souche éprouvée. Un des deux culots est recouvert d'une couche d'huile de paraffine, afin d'éviter le contact de l'air. Les germes qui fermentent font virer l'indicateur de pH (bleu de bromothymol) dans les deux tubes, alors que le virage de l'indicateur dans le seul tube où le milieu est au contact de l'air caractérise les souches capables d'oxyder le glucose.

c. *Caractères biochimiques*

Fermentation des glucides.

On emploie de l'eau peptonée au rouge de phénol dans des tubes contenant une cloche de Durham, et de la gélose inclinée au bleu de bromothymol additionnées de 0,5 p. 100 des divers glucides stérilisés par filtration (arabinose, xylose, glucose, fructose, galactose, saccharose, lactose, maltose, cellobiose, mannitol) et de glycérine. Quelquefois (cas des *Bacillus*) il faut utiliser un milieu minéral de base, sinon l'alcalinité produite par la désamination des peptones neutralise les acides organiques formés et masque la fermentation. Sa composition est telle qu'il contient : $NH_4H_2PO_4$: 1 g ; KCl : 0,2 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,2 g ; gélose Noble : 13 g, et 12 ml d'une solution de bromocrésol pourpre à 0,041 p. 100 pour 1 litre d'eau distillée.

Lait tournesolé.

Après ensemencement, on note les réactions qui se produisent pendant vingt et un jours d'incubation à 28°C.

Eau peptonée simple.

On recherche la production d'indole après vingt-quatre et quarante-huit heures d'incubation à 28°C à l'aide du réactif d'ERLICH-KOVACS.

Milieu de CHRISTENSEN.

On recherche l'hydrolyse de l'urée tous les jours pendant quatorze jours à 28°C.

Bouillon nitraté cystéiné.

Il contient 2 g d'extrait de levure DIFCO, 2 g de Bacto-tryptone DIFCO, 0,5 g de cystéine et 0,5 g de nitrate de potasse dans 1 litre d'une solution minérale de base (SPERBER et ROVIRA, 1959). Après un à sept jours d'incubation à 28°C, on décèle l'hydrogène sulfuré avec un papier au sous-acétate de plomb, l'ammoniaque par le réactif de NESSLER, et les nitrites à l'aide du réactif de GRIESS. S'il y a un dégagement gazeux, on le recueille dans une cloche de Durham.

Parfois, la production de nitrites est fugace. On la détecte aisément à l'aide de la technique de BROUCH (1950) en faisant une suspension épaisse de la souche éprouvée dans 1 ml de tampon phosphate M/15 à pH 6,8 contenant 0,1 p. 100 de nitrate de potassium. Après 15 à 30 minutes, les nitrites qui apparaissent sont mis en évidence (réactif de GRIESS).

Milieu de CLARK *et* LUBS *et milieu de* FOUAD.

On y recherche la production d'acétyl-méthyl-carbinol par la technique de BARRITT, et on y fait la réaction au rouge de méthyle après deux et quatre jours d'incubation à 28°C.

Utilisation du citrate.

On emploie la technique décrite par HOLDING (1960). Le milieu contient $NH_4H_2PO_4$: 0,5 g; K_2HPO_4 : 0,5 g ; extrait de levure DIFCO : 0,5 g ; gélose Noble : 5 g ; Na citrate, $2H_2O$: 5 g, pour un litre d'eau distillée. Après inoculation en piqûre, le virage de l'indicateur (bleu de bromothymol) vers l'alcalinité indique que l'anion citrique a été utilisé (il faut quelquefois incuber quatorze jours à 28°C).

Nutrition azotée.

Le milieu contient $(NH_4)_2HPO_4$: 0,5 g ; K_2HPO_4 : 0,5 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,2 g ; $MnSO_4$, H_2O : 0,1 g ; $CaCl_2$, $2H_2O$: 0,1 g ; $FeCl_3$: 0,01 g ; NaCl : 0,1 g ; KNO_3 : 1 g dans un litre d'eau distillée. On y ajoute après stérilisation à l'autoclave 10 g de glucose stérilisés par filtration. Une fois les souches ensemencées, on mesure leur croissance par turbidimétrie pendant quatorze jours d'incubation à 28°C.

Nutrition carbonée.

On emploie le milieu minéral de base ayant servi à l'étude de la nutrition azotée et l'on y incorpore trois substrats carbonés spécifiques pour des Bactéries déterminées.

On fait un milieu à l'alkylamine en ajoutant aseptiquement à la solution minérale de base 0,5 p. 100 (volume/volume) d'éthanolamine.

Si l'on met 0,2 p. 100 (poids/volume) d'alginate de sodium, on obtient le milieu à l'acide alginique.

Le milieu au phénol se réalise par l'addition de 0,05 p. 100 (poids/volume) de phénol.

Après avoir ensemencé les différentes souches, on détermine celles qui ont une croissance mesurable après quatorze jours d'incubation à 28°C.

Production de catalase.

On la recherche après vingt-quatre heures d'incubation à 28°C dans des cultures sur de la gélose inclinée ou dans du bouillon nutritif en ajoutant quelques gouttes d'eau oxygénée à 10 vol.

Production de gélatinase.

On utilise la technique décrite par FRAZIER (1926) qui consiste à ensemencer par piqûre centrale la surface d'une plaque de gélose nutritive contenant 4 p. 1 000 de gélatine. Après quatorze jours d'incubation à 28°C, on recouvre le tout de chlorure mercurique (15 g) dissous dans de l'acide chlorhydrique dilué (1 litre à 20 p. 100). Les colonies de germes producteurs de gélatinase sont entourées d'une zone claire où la gélatine ne précipite pas.

Production de lécithinase.

Il faut avoir une gélose nutritive contenant 10 p. 100 (volume/volume) d'émulsion de jaune d'œuf (KLINGE, 1957) que l'on ensemence par piqûre au centre de la plaque. La présence de lécithinase forme un précipité autour de la colonie après une incubation qui peut durer vingt et un jours à 28°C.

Production d'amylase.

L'inoculation convenable des souches éprouvées s'obtient à l'aide d'une piqûre centrale à la surface d'une plaque de gélose nutritive contenant 0,2 p. 100 (poids/volume) d'amidon soluble. Après sept, quatorze et vingt et un jours d'incubation à 28°C, la plaque est recouverte d'une solution diluée d'iode.

Production de caséase.

On mélange en quantités égales du lait écrémé stérile et de la gélose à 2 p. 100. L'ensemencement de la souche étudiée se fait par piqûre au centre de la plaque. Après plusieurs jours d'incubation à 28°C, l'apparition d'une zone claire autour de la colonie signale la présence de caséase.

Réaction oxydasique.

GABY et HADLEY (1957) ont démontré que toutes les souches du genre *Pseudomonas* ensemencées dans un bouillon de viande additionné de 1 p. 100 de peptones, après incubation, modifiaient la réaction oxydasique du milieu, donnant une coloration bleue en présence d'oxalate de diméthyl *p*-phénylènenediamine. Il faut environ vingt-quatre heures d'incubation à 28°C pour obtenir de bons résultats.

Décomposition de l'arginine.

On utilise le milieu de THORNLEY (1960) qui contient : Bacto-tryptone DIFCO : 1 g ; NaCl : 5 g ; K_2HPO_4 : 0,3 g ; gélose Noble DIFCO : 3 g ; rouge de phénol : 0,01 g ; chlorhydrate d'arginine : 10 g pour 1 litre d'eau distillée. On ensemence ce milieu en culot par piqûre centrale à raison de deux tubes par souche éprouvée. Un des deux culots est recouvert d'une couche d'huile de paraffine, afin d'éviter le contact de l'air. En anaérobiose, toutes les souches du genre *Pseudomonas* désaminent l'arginine et alcalinisent le milieu.

4. — MILIEUX LIQUIDES UTILISÉS POUR LA RECHERCHE DES PHYTOHORMONES

Il n'est pas possible d'employer toujours le même milieu pour la recherche des phytohormones quel que soit le test biologique retenu. En effet, l'expérience montre qu'un milieu trop complexe n'est pas favorable à la recherche biochromatographique d'acide indole-3-acétique d'origine bactérienne, d'où la nécessité de modifier la constitution du milieu choisi. En outre, il semble à la lecture des résultats obtenus (BRIAN, 1960) qu'une quantité importante de glucose favorise la production microbienne de gibberellines.

a. *Tests du coléoptile de Blé et de la croissance des racines du Blé*

Le milieu contient :

KH_2PO_4 : 0,5 g ; Na_2HPO_4, $2H_2O$: 0,5 g ; NH_4NO_3 : 0,5 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,2 g ; $CaCl_2$, $2H_2O$: 0,1 g ; NaCl : 0,1 g ; $FeCl_3$: 0,01 g ; extrait de levure DIFCO : 0,5 g ; hydrolysat de caséine DIFCO : 0,05 g ; Bacto-tryptone DIFCO : 2 g pour 1 litre d'eau distillée. On y ajoute, après stérilisation à l'autoclave pendant 20 minutes à 120°C, 1 g de DL- tryptophane et 5 g de glucose stérilisés par filtration.

b. *Test des plantules de Pois nains*

Le milieu contient :

KH_2PO_4 : 0,5 g ; Na_2HPO_4, $2H_2O$: 0,5 g ; NH_4NO_3 : 1 g ; $MgSO_4$, $7H_2O$: 0,2 g ; $MnSO_4$, H_2O : 0,1 g ; $CaCl_2$, $2H_2O$: 0,1 g ; NaCl : 0,1 g ; extrait de levure DIFCO : 0,5 g ; hydrolysat de caséine DIFCO : 0,5 g ; Bacto-tryptone DIFCO : 2 g pour un litre d'eau distillée. On y ajoute, après stérilisation à l'autoclave durant 20 minutes à 120°C, 10 g de glucose stérilisé par filtration.

Dans le cas des souches n'ayant pas une croissance convenable dans ces deux milieux, on ajoute en plus 100 ml d'extrait de terre préparé selon la technique classique (POCHON, 1954) et 10 ml de chacune des trois solutions suivantes stérilisées par filtration :

— Aneurine, 100 mg ; biotine, 0,4 mg pour 1 litre d'eau distillée.

— Acide nicotinique : 100 mg ; pyridoxine : 250 mg ; pantothénate de calcium : 100 mg ; acide *p*-aminobenzoïque : 20 mg ; acide folique : 1 mg pour 1 litre d'eau distillée.

— Riboflavine, 50 mg pour 1 litre d'eau distillée.

5. — RECHERCHE DES PHYTOHORMONES

L'expérimentation a porté sur 146 souches pures dont on connaît le groupe nutritionnel. Après un, deux, trois, quatre, huit et douze jours d'incubation à 28°C, les cultures bactériennes sont filtrées sur amiante-cellulose (SEITZ, EKS). On peut alors comparer l'activité phytohormonale du filtrat de chaque culture avec celle d'un milieu témoin non ensemencé, en utilisant trois tests biologiques.

a. *Croissance linéaire du coléoptile de Blé*

La technique employée dérive de celle mise au point par NITSCH (1956).

Les grains du Blé var. *seneca* sont mis à tremper deux heures à la température ordinaire dans de l'eau distillée, puis introduits dans des boîtes de Pétri contenant une feuille de papier-filtre humidifiée. On les laisse incuber durant trois jours à 25°C à l'obscurité. Quand les coléoptiles atteignent 2,5 cm de long, on coupe des sections de 5 mm de longueur juste à 3 mm au-dessous de leur extrémité. Il faut ensuite les porter trois heures dans de l'eau distillée. On prélève alors dix segments que l'on introduit dans une petite boîte de Pétri de 45 mm de diamètre contenant 1 ml du filtrat, dilué ou non, de la culture bactérienne à tester, et 2 ml d'une solution telle que le mélange final contienne 2 p. 100 de saccharose dans un tampon à pH 5,0 (K_2HPO_4 : 1,794g/l + acide citrique monohydraté, 1,019 g/l). Les segments qui flottent à la surface du liquide de chaque boîte sont incubés à l'obscurité pendant vingt heures à 25°C. Puis on mesure leur longueur afin de faire la moyenne et de la comparer à celles obtenues dans un témoin (milieu non ensemencé) et une solution à diverses concentrations d'acide indole-3-acétique (500 — 250 — 100 — 50 — 25 et 10 µg/l), réalisés dans les mêmes conditions. Pour chaque souche éprouvée, il est indispensable de faire le test complet en utilisant 1 ml de filtrat de la culture et les dilutions au 1/10, au 1/100, et au 1/1 000 (avec des témoins correspondants). Dans l'interprétation des résultats, on ne tient compte que des allongements moyens supérieurs à 10 p. 100 par rapport aux témoins. Il faut noter qu'à part la mesure finale, toutes les opérations sont réalisées à l'obscurité, ou dans une chambre noire éclairée en lumière rouge.

b. *Élongation des plantules de Pois nains*

On utilise des Pois nains très hatifs var. *Annonay* (G. TRUFFAUT). Les graines sont aussi mises à germer dans des boîtes de Pétri contenant une feuille de papier-filtre humidifiée. Après trois jours à l'étuve à 25°C, on repique en plusieurs exemplaires sept graines par pot contenant environ deux kg de terre homogène tamisée. Quand les jeunes plantules ont leurs deux premières feuilles après dix jours environ de séjour en serre, on vaporise les diverses solutions étudiées au moyen d'un pulvérisateur WAAST suivant deux directions opposées, de manière à bien mouiller l'ensemble des parties aériennes. La solution témoin est constituée du milieu de culture non ensemencé additionné d'un mouillant (Tween 20 dilué au 1/10, à raison de 3 gouttes pour 15 ml). La solution de référence est une solution aqueuse d'acide gibberellique pur (S. E. A. B.) à 2 µg/l. Les essais se font à l'aide du filtrat de la culture non dilué des diverses souches. Bien entendu, toutes les solutions à vaporiser sont additionnées de mouillant comme la solution témoin. Chaque plante, repérée individuellement, est mesurée avant le traitement depuis le niveau du sol jusqu'au sommet. Les pots, trois par essai, soit vingt et une plantes, sont rassemblés de telle sorte que les Pois aient à peu près la même hauteur moyenne, et reportés dans la serre après vaporisation. De nouvelles mesures ont lieu quatre et huit jours après le traitement. On calcule l'élongation moyenne par rapport au témoin. Là encore, on ne tient compte que des élongations moyennes supérieures à 10 p. 100 dans l'interprétation des résultats.

c. *Croissance des racines du Blé*

La technique, inspirée de celle décrite par BOWEN et ROVIRA (1961), consiste à éprouver l'action des souches sur la croissance des racines d'une plante semblable à celle dans la rhizosphère de laquelle ces Bactéries ont été isolées. Pour ce faire, les grains du Blé var. *fylgia* sont désinfectés par trempage dans une solution à 2 p. 1 000 de chlorure mercurique dans l'éthanol à 70 p. 100. Après des lavages dans de l'eau stérile pour éliminer les traces de germicide, les grains sont mis à germer sur des plaques de gélose nutritive incubées soixante-douze heures à 22°C pour contrôler l'asepsie et le pouvoir germinatif. Les grains une fois germés sont introduits aseptiquement, un grain par tube, dans des tubes de 18 × 250 mm contenant 20 ml d'une solution minérale (RIVIÈRE, 1960) gélosée à 5 p. 100. Auparavant, on a incorporé, pour toute souche éprouvée et par tube, 2 ml du filtrat aseptique de la culture (essais) ou du milieu non ensemencé (témoin), chaque fois en quatre exemplaires. On détermine aussi la croissance des racines du même Blé cultivé dans un tube de milieu minéral gélosé additionné de 0,1 ml d'une solution de référence (acide indole-3-acétique à 100 mg par litre).

Après huit et quinze jours de séjour dans une serre-étuve réglée à 20°C et éclairée douze heures chaque jour par des tubes fluorescents type lumière du jour (MAZDA), on examine en transparence l'aspect et la croissance des racines de la jeune plantule de Blé.

d. *Séparation chromatographique et caractérisation des substances actives*

A l'aide des techniques que nous venons de décrire, on peut mettre en évidence dans le filtrat de certaines cultures bactériennes des substances biologiquement actives, sans pouvoir préciser leur nature. Pour essayer de le faire, on peut effectuer une séparation chromatographique après avoir ensemencé les diverses souches responsables dans deux milieux synthétiques relativement simplifiés, dépourvus des substances organiques complexes qui rendent la séparation difficile, voire impossible.

Milieu I.

Il contient : KH_2PO_4 : 0,5 g ; $Na_2HPO_4, 2H_2O$: 0,5 g ; NH_4NO_3 : 1 g ; $MgSO_4, 7H_2O$: 0,2 g ; $CaCl_2, 2H_2O$: 0,1 g ; NaCl : 0,1 g ; $FeCl_3$: 0,01 g dans un litre d'eau distillée. Après filtration, puis répartition dans des fioles d'Erlenmeyer de 150 ml à raison de 50 ml de milieu, et 20 minutes de stérilisation à 120°C, on ajoute aseptiquement 5 g/l de glucose stérilisé par filtration.

Milieu II.

Il a la même composition avec en plus 0,5 g de DL-tryptophane stérilisé par filtration.

Si des Bactéries ne peuvent se développer normalement dans un tel milieu minéral, on ajoute, en outre, 10 ml de chacune des trois solutions de vitamines (voir paragraphe 4, *b*) et 50 ml d'une solution à 0,25 g par litre des acides aminés suivants :

L-cystéine ; DL-alanine ; L-proline ; L-asparagine ; L-acide glumatique ; DL-acide aspartique ; L-arginine ; L-leucine ; DL-lysine ; glycine.

Après une incubation à 28°C pendant une durée variable (24 à 72 heures) suivant les souches éprouvées, on filtre chaque culture pour la débarrasser des cellules microbiennes (SEITZ, EKS). C'est avec le filtrat obtenu que l'on fait un chromatogramme ascendant unidimensionnel sur papier WHATMAN 3 MM à l'aide d'un solvant constitué d'un mélange d'isopropanol (80 p. 100), d'ammoniaque à 26 p. 100 (0,1 p. 100) et d'eau (19,9 p. 100) suivant la technique décrite par NITSCH (1955).

Après la séparation chromatographique, les papiers sont séchés et les taches colorées après pulvérisation du réactif de GORDON et WEBER (1951). Il s'agit d'un mélange contenant 100 ml d'acide perchlorique à 35 p. 100, 270 mg de perchlorure ferrique et 100 ml d'éthanol à 95 p. 100. On compare alors les chromatogrammes obtenus pour chaque filtrat de culture avec un chromatogramme témoin fait à l'aide d'une solution pure d'acide indole-3-acétique, ce qui permet de caractériser les taches d'après leur Rf (0,30 environ pour l'acide indole-3-acétique).

Connaissant maintenant la position de ces taches, on peut mesurer l'activité réelle du filtrat de chaque culture à l'aide d'un biochromatogramme qui comporte une séparation chromatographique suivie par une révélation à l'aide d'un test biologique. A cet effet, quand le solvant a atteint une distance de 20 cm, la feuille de papier est retirée, séchée dans un courant d'air et découpée transversalement en 10 fragments correspondant chacun à un Rf déterminé : 0,0 à 0,1 ; 0,1 à 0,2... 0,9 à 1,0. Les fragments de papier sont alors introduits chacun directement dans une fiole Erlenmeyer horizontale contenant une solution tampon saccharosée, convenablement agitée, avec laquelle on effectue le test du mésocotyle d'Avoine (NITSCH, 1956).

RÉSULTATS

Nous examinerons successivement les résultats concernant la répartition des genres et des groupes nutritionnels bactériens dans la rhizosphère et dans le sol éloigné ou témoin, puis les données relatives à l'isolement et à l'identification des Bactéries produisant des phytohormones. Enfin, nous verrons s'il y a une possibilité de caractériser les substances actives dans le filtrat des cultures qui modifient la croissance des racines du Blé.

A. — Répartition des genres et des groupes nutritionnels bactériens.

Bien que l'expérimentation ait été réalisée à deux époques différentes, au début, puis à la fin du printemps, les résultats collationnés dans les tableaux 1 et 2 ne présentent pas entre eux de différences significatives. Ils semblent donc indépendants de la date du semis si le prélèvement se fait toujours au même stade de la croissance du Blé, quand l'effet rhizosphère est le plus élevé, c'est-à-dire à la fin du tallage, au début de la montée.

1° Après avoir réparti les Bactéries isolées de la rhizosphère et du sol témoin correspondant dans quatre groupes, en fonction de leur morphologie et de leur genre, la lecture des résultats résumés dans le tableau 1 fait ressortir un certain nombre de faits paraissant bien établis. On distingue, en effet :

a) Les Bactéries de forme arrondie, ou coques, qui appartiennent toutes à deux genres définis par leur morphologie, leur comportement vis-à-vis de l'oxygène et leur action sur le glucose, *Sarcina* et *Micrococcus*.

b) Les bâtonnets Gram négatifs qui d'après leur morphologie, leurs caractères culturaux et leurs caractères biochimiques peuvent entrer dans différents genres, *Alcaligenes, Erwinia, Achromobacter, Flavobacterium, Xanthomonas* et *Pseudomonas*.

c) Les Bactéries sporulées qui sont toutes des souches du genre *Bacillus*.

d) Les formes ramifiées que l'on peut classer selon leur morphologie, l'acido-résistance, la coloration de Gram et l'utilisation du phénol en *Arthrobacter, Nocardia, Mycoplana, Mycobacterium, Streptomyces* et *Micromonospora*.

On remarque alors que les bâtonnets Gram négatifs prédominent dans la rhizosphère du Blé où ils sont relativement plus abondants que dans le sol éloigné ou témoin. C'est l'inverse qui se passe avec les Bactéries sporulées. Dans tous les cas, il y a peu de Bactéries de forme arrondie et leur pourcentage ne varie guère. Les formes ramifiées sont assez nombreuses, puisqu'elles représentent, en moyenne, 26 p. 100 des souches isolées, mais leur proportion est juste un tout petit peu plus élevée dans le sol éloigné que dans la rhizosphère.

2° Dans le tableau 2, nous avons classé ces Bactéries dans trois groupes d'après leurs besoins nutritionnels.

a) Les Bactéries à fort pouvoir de synthèse, ayant des besoins simples, utilisant l'azote sous forme minérale. Elles se manifestent par une bonne croissance dans le milieu minéral de base glucosé ou milieu B.

b) Les Bactéries nécessitant des acides aminés. Elles se développent bien dans le milieu A qui contient en plus des acides aminés, alors que leur croissance est faible ou nulle dans le milieu B.

TABLEAU I

Répartition des Bactéries suivant leur genre dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *et dans le sol témoin correspondant*

Essais au moment du tallage	Nombre approximatif (millions/g)	Nombre total des souches isolées	Coques : *Sarcina, Micrococcus*		Bâtonnets Gram négatifs *Alcaligenes, Erwinia, Achromobacter, Pseudomonas, Xanthomonas, Flavobacterium*		Bâtonnets sporulés : *Bacillus*		Formes ramifiées : *Arthrobacter, Nocardia, Mycoplana, Mycobacterium, Micromonospora, Streptomyces*	
			Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)	Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)	Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)	Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif millions/g
Rhizosphère :										
1	108	146	6,8	7,3	54,7	59,1	15,2	16,4	23,3	25,2
2	94	252	4,5	4,2	56,6	53,2	18,3	17,2	20,6	19,4
Sol témoin :										
1	17	180	5,5	0,9	29,1	4,9	40,2	6,8	25,2	4,4
2	18	200	6,2	1,1	24,3	4,4	33,3	6,0	36,2	6,5

1 : L'expérience a été faite au début du printemps. 2 : L'expérience a été faite à la fin du printemps.

TABLEAU 2

Répartition des Bactéries d'après leurs besoins nutritionnels dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *et dans le sol témoin correspondant*

Essais au moment du tallage	Nombre approximatif (millions/g)	Nombre total des souches isolées	Bactéries ayant des besoins simples		Bactéries nécessitant des acides aminés		Bactéries nécessitant des facteurs de croissance	
			Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)	Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)	Pourcentage des souches isolées	Nombre approximatif (millions/g)
Rhizosphère :								
1.....	108	146	64,4	69,6	10,9	11,8	24,7	26,6
2.....	94	252	56,5	53,1	15,8	14,8	27,7	26,1
Sol témoin :								
1.....	17	180	52,2	8,9	18,9	3,2	28,9	4,9
2.....	18	200	57,0	10,3	19,0	3,4	24,0	4,3

1 : L'expérience a été faite au début du printemps. 2 : L'expérience a été faite à la fin du printemps.

TABLEAU 4

Action du filtrat de la culture des Bactéries isolées de la rhizosphère du Blé var. fylgia *sur la croissance des plantes*

Souches éprouvées : 146				Milieu de culture utilisé		Activité phytohormonale du filtrat de culture sur				
				Simple	Additionné de vitamines et d'extrait de terre	la croissance linéaire du coléoptile de Blé à la dilution de :				l'élongation des plantules de Pois nains à la dilution
Groupe bactérien	N° des souches	Caractérisation des souches	Groupe nutritionnel[1]	Durée d'incubation	Durée d'incubation	1	1/10	1/100	1/1 000	1
Coques	51	*Sarcina flava*	B	48 heures		+	+	0	0	0
	52	*Sarcina flava*	B	48 heures		+	+	0	0	0
Bactéries sporulées	49	*Bacillus cereus*	B	48 heures		+	0	0	0	0
	73	*Bacillus megaterium*	B	48 heures		+	+	0	0	0
	66	*Bacillus brevis*	YS		8 jours	+	+	0	0	+
	113	*Bacillus circulans*	A	48 heures		+	0	0	0	0
Formes ramifiées	129	*Arthrobacter pascens*	B	48 heures		+	0	0	0	0
	94	*Arthrobacter* sp.	B	48 heures		+	+	0	0	0
	21	*Mycococcus albus*	B	48 heures		+	+	0	0	0
	15	*Nocardia* sp.	YS		12 jours	+	+	0	0	+
	104	*Nocardia* sp.	A	3 jours		+	0	0	0	0
	36	*Nocardia* sp.	B		3 jours	+	+	0	0	0

B : Bactéries se développant dans un milieu minéral de base additionné de glucose.
A : Bactéries nécessitant des acides aminés.
YS : Bactéries nécessitant les facteurs de croissance contenus dans l'extrait de levure et dans l'extrait de terre.

TABLEAU 5

Détermination du nombre et du pourcentage des souches bactériennes isolées dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *et produisant des phytohormones*

Souches bactériennes isolées	Activité phytohormonale du filtrat de culture sur				
	la croissance linéaire du coléoptile de Blé à la dilution de				l'élongation des plantules de Pois nains à la dilution 1
	1	1/10	1/100	1/1 000	
Pourcentage	18,5	10,9	2,0	0	3,4
Nombre approximatif : millions/g de terre (en poids sec)	20,0	17,1	2,1	0	3,7

TABLEAU 6

Répartition suivant leur morphologie des Bactéries isolées dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *et produisant des phytohormones*

Souches bactériennes isolées	Nombre de germes en millions/g de terre (en poids sec)	Pourcentage de souches isolées dont le filtrat de culture agit				
		sur la croissance du coléoptile de Blé à la dilution de				sur l'élongation des plantules de Pois nains à la dilution 1
		1	1/10	1/100	1/1 000	
Coques : *Sarcina*.....	1,5	1,4	1,4	0	0	0
Bâtonnets Gram négatifs : *Alcaligenes, Pseudomonas*.... *Xanthomonas, Flavobacterium, Achromobacter*	12,5	10,3	5,4	2,0	0	2,0
Bactéries sporulées : *Bacillus*	2,9	2,7	1,4	0	0	0,7
Formes ramifiées : *Arthrobacter, Mycococcus Nocardia*	4,4	4,1	2,7	0	0	0,7

4° Ces souches actives ayant été classées d'après leurs caractères nutritionnels (tableau 7), on remarque qu'elles se partagent à peu près par moitié en Bactéries à fort pouvoir de synthèse et en Bactéries nécessitant des facteurs de croissance contenus

dans l'extrait de terre et dans l'extrait de levure. Les Bactéries nécessitant uniquement des acides aminés pour leur croissance jouent donc un rôle très restreint dans la libération des phytohormones au sein de la rhizosphère.

TABLEAU 7

Répartition suivant leurs besoins nutritionnels des Bactéries isolées dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *et produisant des phytohormones*

Souches bactériennes isolées	Nombre de germes en millions/g de terre (en poids sec)	Pourcentage de souches isolées dont le filtrat de culture agit				
		sur la croissance du coléoptile de Blé à la dilution de				sur l'élongation des plantules de Pois nains à la dilution 1
		1	1/10	1/100	1/1 000	
Bactéries ayant des besoins simples.....	10,8	10,2	6,1	1,4	0	0,7
Bactéries nécessitant des acides aminés	2,2	2,0	0,7	0	0	0
Bactéries nécessitant des facteurs de croissance (extrait de levure + extrait de terre)	8,1	6,3	4,1	0,7	0	2,7

5° Lorsqu'on examine l'action du filtrat de culture de toutes les Bactéries productrices de phytohormones (décelées au moyen des deux tests cités) sur la croissance des racines du Blé var. *fylgia* cultivé aseptiquement dans un milieu minéral gélosé (tableau 8,), on s'aperçoit que certaines souches seulement se manifestent. Une partie d'entre elles provoque des modifications dans la croissance des racines analogues à celles obtenues après l'apport dans le milieu de fortes concentrations d'acide indole-3-acétique (500 μg par litre). En effet, les racines sont courtes, épaisses, avec de nombreux poils absorbants, mais pas de ramifications (voir fig. 1 et 2). Les autres Bactéries semblent exercer une action plus discrète, mais aussi plus diversifiée. On observe parfois des racines plus longues, très ramifiées, riches en poils absorbants (voir fig. 3). Dans d'autres cas, l'addition du filtrat d'une culture bactérienne provoque une inhibition de la croissance des racines (voir fig. 4) moins accentuée que celle due à une forte concentration d'auxine (voir fig. 1).

En résumé, quatre types d'actions dues aux Bactéries de la rhizosphère sont provoquées par l'addition d'une même quantité du filtrat de leur culture dans un milieu minéral gélosé où une jeune plantule de Blé croît aseptiquement.

a) Une inhibition de la croissance des racines comparable à celle obtenue avec une forte concentration d'acide indole-3-acétique :

Souches 9, 92, 94, 98.

b) Des modifications dans la croissance des racines se traduisant par une légère inhibition :

Souches 73, 121.

PLANCHES I et II.

Mise en évidence de l'action du filtrat de la culture de quelques Bactéries isolées dans la rhizosphère du Blé var. fylgia *sur la croissance des racines de cette plante. Les grains de Blé, une fois désinfectés, sont déposés à la surface d'une solution minérale gélosée à 5 p.* 1 000 *répartie dans des tubes de* 18 × 250 mm. *On laisse incuber* 15 *jours à* 20°C *en éclairant la culture* 12 *heures par jour à l'aide de tubes fluorescents type lumière du jour avant d'examiner les racines en transparence.*

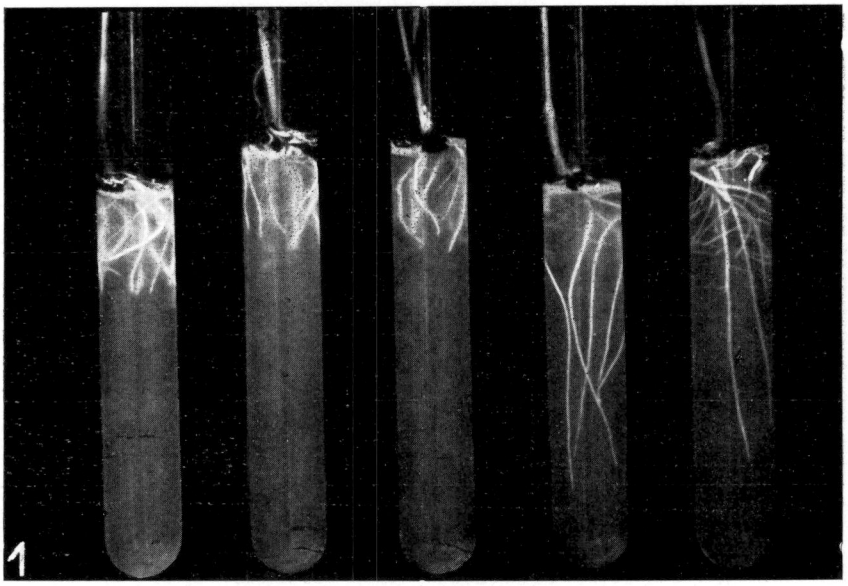


FIG. 1. — *Dans les trois tubes de gauche, le milieu gélosé contient* 0,1 *ml d'une solution d'acide indole 3-acétique à* 100 *mg/litre, soit une concentration d'environ* 500 µg/*litre. On remarque que les racines sont courtes, épaisses, peu ou pas ramifiées, avec cependant d'assez nombreux poils absorbants. Leur croissance paraît donc fortement inhibée par rapport à celle des racines du même Blé cultivé dans un milieu minéral gélosé témoin (les deux tubes à droite de la photo).*

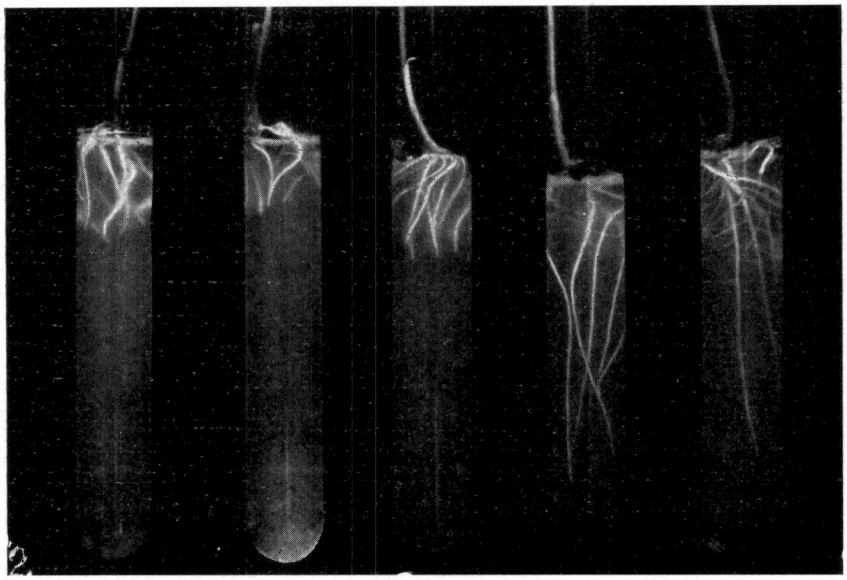


FIG. 2. — *Dans chacun des trois tubes de gauche, on a ajouté aseptiquement, en les mélangeant bien dans le milieu minéral gélosé pour avoir une répartition homogène,* 2 *ml du filtrat d'une culture de* 48 *heures à* 28°C *de la souche* 92 (Pseudomonas fluorescens). *Par rapport aux témoins (les deux tubes à droite de la photo) qui contiennent en mélange* 2 *ml du milieu de culture bactérien non ensemencé, on voit que la croissance des racines soumises à l'action bactérienne semble se comporter comme s'il y avait de l'acide indole-3-acétique sous une forte concentration. Dans cet essai le filtrat de la culture étudiée est dilué environ au* 1/10.

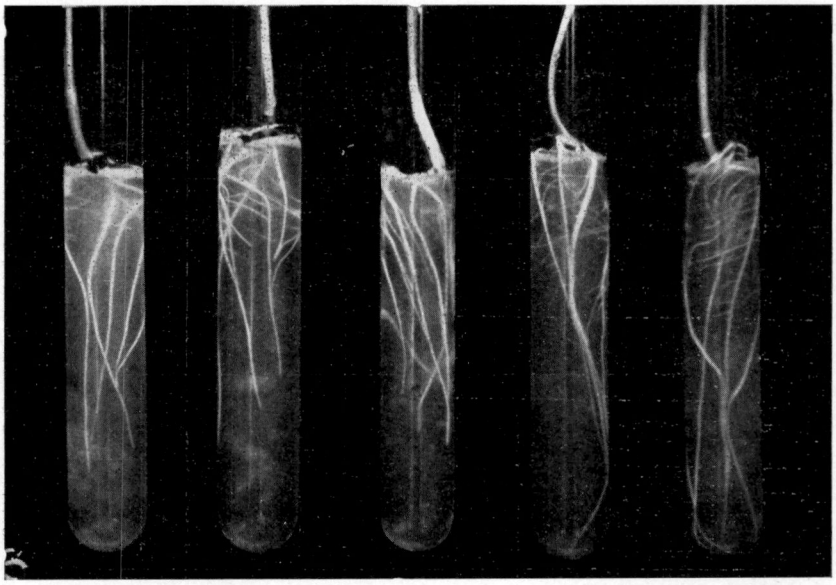


FIG. 3. — *Par rapport aux témoins (les trois tubes de gauche), l'addition dans le milieu minéral gélosé de 2 ml du filtrat de la culture de la souche* 129 (Arthrobacter pascens) *se manifeste par des modifications dans la croissance des racines. On voit qu'elles sont plus longues, très ramifiées, et qu'elles paraissent plus riches en poils absorbants (les deux tubes à droite de la photo).*
Dans cet essai, le filtrat de la culture étudiée est dilué environ au 1/10.

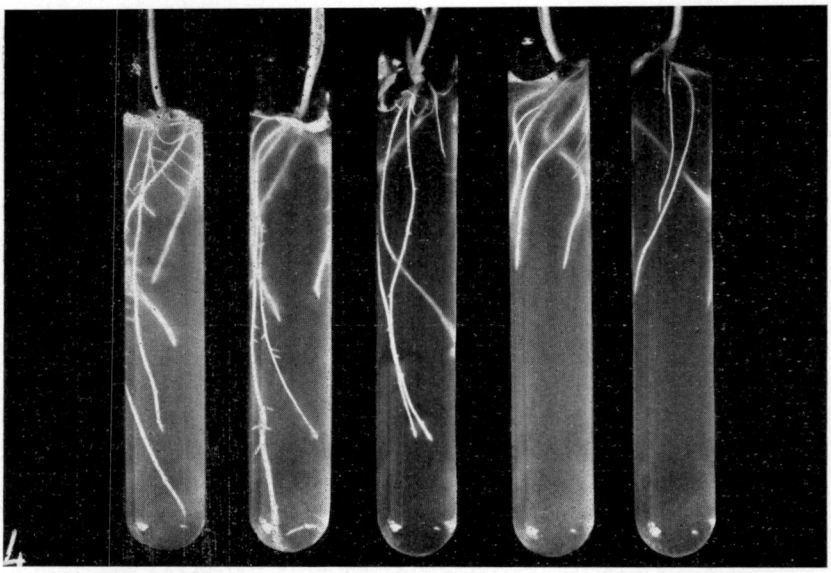


FIG. 4. — *Par rapport aux témoins (les trois tubes de gauche), l'addition dans le milieu minéral gélosé de 2 ml du filtrat de la culture de la souche* 121 (Flavobacterium diffusum) *se manifeste par des modifications dans la croissance des racines. Celles-ci sont plus courtes, plus épaisses, peu ou pas ramifiées, mais moins fortement inhibées que dans le cas de la fig.* 1 *où la concentration d'acide indole-*3*-acétique était élevée.*

TABLEAU 8

Action du filtrat de la culture des Bactéries isolées de la rhizosphère du Blé var. fylgia *sur la croissance des racines de cette plante*

Souches éprouvées : 146				Durée d'incubation (en heures)	Activité phytohormonale du filtrat de culture manifestée par		
Groupe bactérien	N° des souches	Caractérisation des souches	Groupe nutritionnel		une forte inhibition de la croissance des racines du Blé à la dilution 1/10	une faible inhibition de la croissance des racines du Blé à la dilution 1/10	des modifications dans la longueur des racines, le nombre des ramifications et des poils absorbants à la dilution 1/10
Coques	51, 52	*Sarcina flava*.....	B	48	0	0	0
Bâtonnets Gram négatifs	9	*Pseudomonas* sp.....	B	48	+	0	0
	92	*Pseudomonas fluorescens*	B	24	+	0	0
	98	*Xanthomonas* sp. ...	B	48	+	0	0
	121	*Flavobacterium diffusum*.....	B	48	0	+	0
Bactéries sporulées	73	*Bacillus megaterium* .	B	48	0	+	0
Formes ramifiées	94	*Arthrobacter* sp.	B	48	+	0	0
	129	*Arthrobacter pascens* .	B	48	0	0	+

B : Bactéries se développant dans un milieu minéral de base additionné de glucose.
A : Bactéries nécessitant des acides aminés.
YS : Bactéries nécessitant les facteurs de croissance contenus dans l'extrait de levure et dans l'extrait de terre.

c) Des modifications dans la croissance des racines se traduisant par une augmentation de la longueur et du nombre des ramifications et des poils absorbants :

Souche 129.

d) Pas de modifications apparentes : toutes les autres souches isolées (51, 52... etc).

Parmi les Bactéries de la rhizosphère susceptibles d'agir sur la croissance des racines du Blé, on retrouve surtout des bâtonnets Gram négatifs (57 p. 100), quelques formes ramifiées (28 p. 100) et 15 p. 100 de Bactéries sporulées. Toutes les souches actives dans ces conditions ont un fort pouvoir de synthèse puisqu'elles se développent bien dans un simple milieu minéral de base additionné de glucose.

C. — Caractérisation des substances actives

On compare les résultats obtenus dans chaque cas avec une solution pure d'acide indole-3-acétique à diverses concentrations (1 à 100 μg par litre). Il s'agit, pour chaque filtrat de culture bactérienne, de faire un chromatogramme révélé par le réactif de Gordon et Weber (1951), puis un biochromatogramme comportant une révélation à l'aide d'un test biologique, l'allongement du mésocotyle d'Avoine (Nitsch, 1956), à différents Rf. A la lecture du tableau 10, où sont résumés les résultats, on se rend compte que la production d'acide indole-3-acétique par certaines Bactéries isolées de la rhizosphère du Blé var. *fylgia* est possible, à la condition de leur fournir du tryptophane. En effet, au Rf 0,30 qui est celui de l'acide indole-3-acétique dans le mélange utilisé, à partir du filtrat des cultures actives se séparent des substances qui se comportent de la même façon que cet acide (test biologique et réaction chimique caractérisant le noyau indole).

Ainsi, parmi les 29 souches bactériennes isolées de la rhizosphère du Blé et dont le filtrat de la culture contient des phytohormones décelées à l'aide de deux tests biologiques, la croissance linéaire du coléoptile de Blé et l'élongation des plantules de Pois nains, 7, soit 24 p. 100, sont susceptibles d'agir sur la croissance des racines du Blé. Ces dernières souches paraissent toutes capables de produire de l'acide indole-3-acétique, mais seulement à partir du tryptophane.

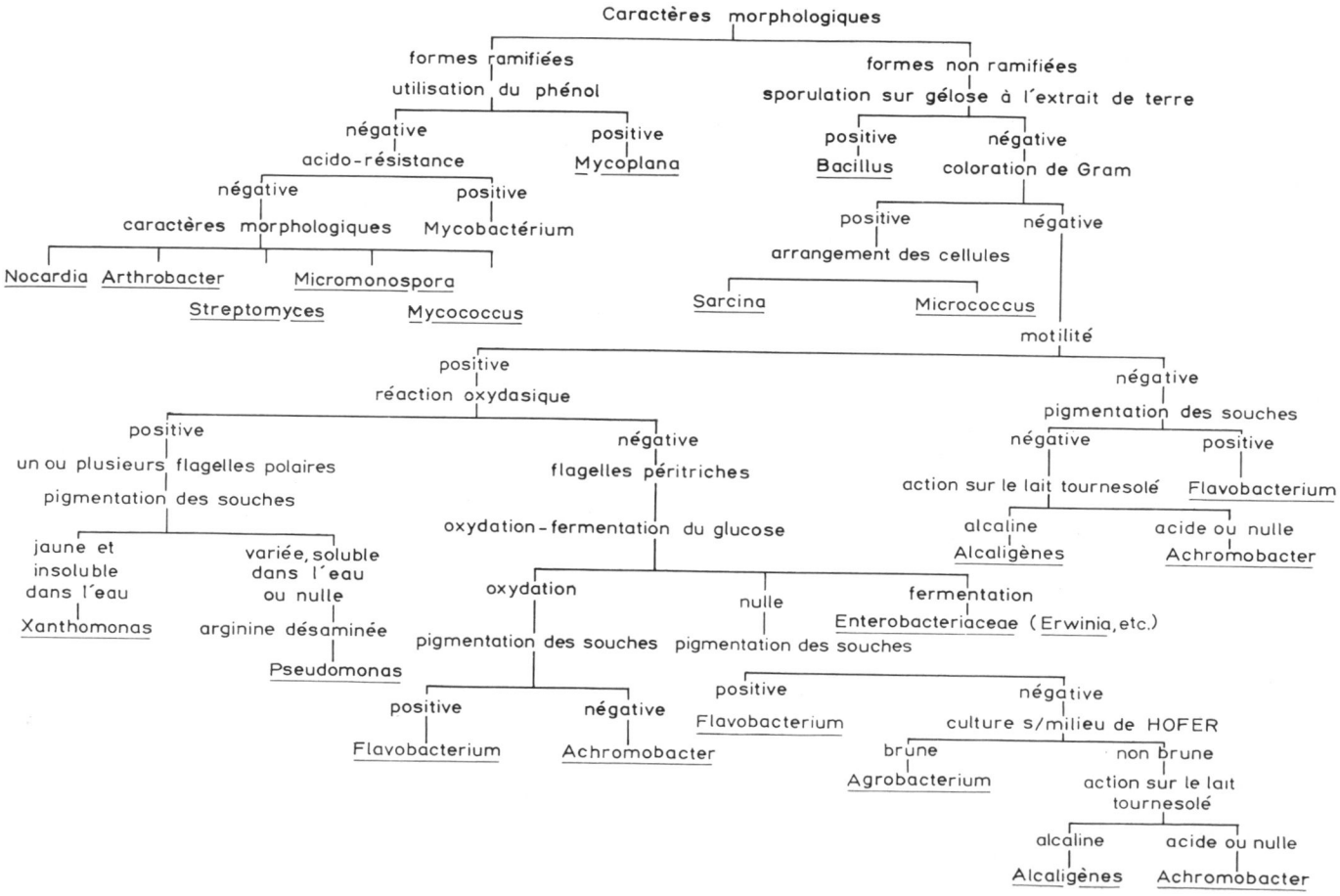
DISCUSSION ET CONCLUSION

Lorsque nous avons abordé l'étude de l'action des Bactéries de la rhizosphère sur la croissance du Blé, trois problèmes distincts se sont posés : la répartition des genres et des groupes nutritionnels, la production bactérienne de phytohormones, et, pour terminer, la caractérisation des substances actives. Il est donc nécessaire de discuter dans cet ordre la valeur des résultats obtenus.

A. — Répartition des genres et des groupes nutritionnels bactériens

On sait peu de choses sur la présence d'espèces bactériennes typiques dans la rhizosphère du Blé, la plupart des auteurs cités dans les revues bibliographiques (Clark, 1949 ; Starkey, 1958) décrivant les Bactéries en termes vagues et imprécis

TABLEAU 9


Caractères morphologiques
formes ramifiées
utilisation du phénol
négative
acido-résistance
négative
caractères morphologiques
Nocardia
Arthrobacter
Micromonospora
Streptomyces
Mycococcus
positive
Mycobactérium
positive
Mycoplana
formes non ramifiées
sporulation sur gélose à l'extrait de terre
positive
Bacillus
négative
coloration de Gram
positive
arrangement des cellules
Sarcina
Micrococcus
négative
motilité
positive
réaction oxydasique
positive
un ou plusieurs flagelles polaires
pigmentation des souches
jaune et insoluble dans l'eau
Xanthomonas
variée, soluble dans l'eau ou nulle
arginine désaminée
Pseudomonas
négative
flagelles péritriches
oxydation-fermentation du glucose
oxydation
pigmentation des souches
positive
Flavobacterium
négative
Achromobacter
nulle
pigmentation des souches
positive
Flavobacterium
négative
culture s/milieu de HOFER
brune
Agrobacterium
non brune
action sur le lait tournesolé
alcaline
Alcaligènes
acide ou nulle
Achromobacter
fermentation
Enterobacteriaceae (Erwinia, etc.)
négative
pigmentation des souches
négative
action sur le lait tournesolé
alcaline
Alcaligènes
acide ou nulle
Achromobacter
positive
Flavobacterium

tels que bâtonnets Gram négatifs, formes coccoïdes, bâtonnets chromogènes ou non. Le fait qu'en dépit d'un grand nombre de recherches, presque rien n'avait été effectué pour classer les diverses souches isolées dans leur genre respectif, s'explique par le manque de connaissances relatives à l'identification des microbes du sol.

1° *Identification générique des Bactéries de la rhizosphère et du sol éloigné ou témoin*

Mais, depuis 1959, l'édition de l'ouvrage de SKERMAN, précieux guide pour la différenciation des genres bactériens, a augmenté considérablement les chances d'identifier les microbes du sol, bien que leur pléomorphisme fréquent et leur inertie biochimique ne facilitent pas le travail. Il faut, cependant, noter que les souches isolées dans la rhizosphère des diverses plantes sont généralement plus actives et s'identifient plus aisément. Un symposium tenu les 6 et 7 juillet 1960, à Bangor [1], consacré au groupe *Pseudomonas-Achromobacter*, a permis de résoudre partiellement le problème de l'identification de ces Bactéries Gram négatives fréquemment rencontrées dans la terre. En faisant une synthèse des notions résumée dans le tableau 9, il nous a été possible, avec quelques difficultés, d'identifier le genre de toutes les Bactéries isolées. On peut alors les ranger dans quatre groupes morphologiques (coques, bâtonnets Gram négatifs, Bactéries sporulées et formes ramifiées), et caractériser l'effet rhizosphère du Blé var. *fylgia* au moment du tallage. Pour ce faire, après avoir isolé et purifié les différentes souches, on commence habituellement par l'examen des caractères morphologiques avant et après coloration (Gram et acido-résistance). L'observation des formes ramifiées nécessite des précautions spéciales, car la gélose nutritive n'est pas toujours favorable à l'apparition des cellules filamenteuses. Il est indispensable d'ensemencer toutes les Bactéries isolées dans un milieu liquide sucré glycérophosphaté, au jus de choucroute (SPERBER et ROVIRA, 1959), puis d'examiner les frottis colorés par la safranine après 24 et 48 heures d'incubation à 28°C. La simple observation microscopique permet alors de différencier les genres *Arthrobacter* et *Nocardia* avec, cependant, quelques risques d'erreur. En principe, les filaments des souches appartenant au genre *Nocardia* sont plus longs, plus minces, et se divisent ensuite rapidement en segments réguliers coccobacillaires, tandis que les cellules bactériennes jeunes du genre *Arthrobacter* existent sous la forme de bâtonnets irréguliers ayant des ébauches de ramifications (c'est pourquoi BREED et *al.*, 1957, les classent parmi les *Eubacteriales* et non parmi les *Actinomycétales*), évoluant ensuite vers des coccobacilles, puis des coques. Tous les microorganismes ramifiés qui utilisent le phénol sont classés dans le genre *Mycoplana*, tandis que l'acido-résistance caractérise les souches appartenant au genre *Mycobacterium*. Les autres germes ramifiés sont assez facilement rangés, d'après leurs caractères morphologiques, dans les genres *Mycoccocus*, *Micromonospora* ou *Streptomyces* (SKERMAN, 1959).

Bien entendu, s'il s'agit de formes toujours arrondies, la différenciation entre les genres *Sarcina* et *Micrococcus* ne présente pas de difficultés, en considérant l'arrangement des cellules au cours de la division cellulaire et la coloration de Gram.

[1] Toutes les communications de ce Symposium sont réunies dans « The Journal of applied Bacteriology, vol. **23** (1960).

Il faut observer les cultures dans de la gélose molle à l'extrait de terre tous les jours (pendant au moins un mois d'incubation à 15°C et à 28°C) pour mettre en évidence les caractéristiques de la sporulation des souches du genre *Bacillus*. L'examen microscopique après coloration à la fuchsine de cultures jeunes (24 heures à 28°C) permet de différencier les formes U et G, ces dernières riches en granulations grais seuses.

Il reste enfin à identifier la plus grande partie des Bactéries isolées de la rhizosphère qui sont des bâtonnets Gram négatifs, dont l'aspect des colonies et la coloration de Gram se déterminent à partir d'une culture sur gélose.

Il est nécessaire d'avoir quelques colonies à la surface d'une gélose nutritive additionnée de lait écrémé, ou d'un milieu spécial (KING et *al.*, 1954) examiné en lumière ultraviolette, pour caractériser la pigmentation typique de certains genres (*Pseudomonas*, *Xanthomonas* et *Flavobacterium*).

Lorsqu'il s'agit de souches mobiles, une réaction oxydasique positive dans le bouillon nutritif (KLINGE, 1960), et la présence de flagelles polaires oriente le diagnostic vers le groupe *Pseudomonas-Xanthomonas* (HOLDING, 1960). Dans ce cas, c'est l'examen de préparations à l'aide du microscope électronique qui donne les meilleurs renseignements sur la disposition ciliaire, mais l'interprétation est quelquefois délicate. Les caractéristiques de la pigmentation permettent de séparer les Bactéries appartenant au genre *Xanthomonas* (pigment jaune insoluble dans l'eau) de celles que l'on classe dans le genre *Pseudomonas*. Ces dernières sont toutes douées de la propriété de désaminer l'arginine (THORNLEY, 1960). Malheureusement pour la suite, la famille des *Achromobacteriaceae* est moins bien connue que la famille des *Pseudomonadaceae*, et la classification actuelle (BREED et *al.* 1957) est loin de donner satisfaction. En effet, par exemple, le genre *Achromobacter* comprend des espèces immobiles à côté d'autres, la majorité, qui sont mobiles à l'aide de flagelles péritriches (INGRAM et SHEWAN, 1960). Dans le cas de souches mobiles avec des flagelles péritriches, ayant une réaction oxydasique négative, la détermination des caractéristiques de l'oxydation ou de la fermentation du glucose (HUGH et LEIFSON, 1953) permet assez rapidement d'éliminer celles qui appartiennent à la famille des *Enterobacteriaceae*. S'il y a des Bactéries qui ne fermentent ni n'oxydent le glucose, la pigmentation jaune exaltée en présence de lait écrémé est associée au genre *Flavobacterium* (certaines espèces pouvant cependant oxyder le glucose). Les bâtonnets Gram négatifs mobiles, n'ayant aucune action vis-à-vis du glucose, mais alcalinisant fortement le lait tournesolé, sont classés dans le genre *Alcaligenes*. De plus, quand on se trouve en présence de souches mobiles à l'aide de flagelles péritriches, n'acidifiant pas les milieux organiques glucosés, il est important de les ensemencer dans un milieu gélosé au mannitol et au glycérophosphate de chaux (HOFER, 1941) pour voir s'il n'y a pas un brunissement caractérisant l'espèce *Agrobacterium radiobacter* ; sinon il s'agit de souches à classer dans le genre *Achromobacter*. Si l'on a affaire à des bâtonnets Gram négatifs immobiles, la pigmentation des colonies et l'action sur le lait tournesolé sont des caractères suffisants pour ranger les souches isolées dans un des trois genres, *Alcaligenes*, *Achromobacter* ou *Flavobacterium* (tableau 9).

Lorsqu'on désire poursuivre l'identification afin de déterminer l'espèce microbienne en cause, il faut suivre la méthode de SKERMAN (1959) et la classification du *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* (BREED et *al.*, 1957).

2. — *Critique des résultats obtenus*

C'est ainsi que SPERBER et ROVIRA (1959) ont pu décrire avec précision les différentes Bactéries provenant de la rhizosphère du Trèfle et du Ray-grass. Ils trouvent un pourcentage élevé de souches appartenant au genre *Arthrobacter* (63 et 78 p. 100 respectivement). Malheureusement, ils n'ont pas fait la comparaison avec le sol éloigné ou témoin, et ne peuvent pas tirer de conclusions s'appliquant à l'effet rhizosphère. Leurs résultats s'opposent à ceux de ROUATT et KATZNELSON (1961) qui sont, dans le cas du Blé, en accord avec d'autres auteurs (VOZNIAKOVSKAIA et ZHIL'TSOVA, 1958 ; VAGNEROVA et *al.*, 1960), pour qui l'abondance des Bactéries Gram négatives, appartenant particulièrement à la famille des *Pseudomonadaceae*, est caractéristique de la rhizosphère. Il faut noter que les derniers auteurs cités n'ont expérimenté qu'avec de jeunes plantules. Pour notre part, la lecture des résultats résumés dans le tableau 1 tend à prouver que l'on peut admettre que des Bactéries Gram négatives, appartenant à plusieurs genres distincts (*Alcaligenes, Erwinia, Achromobacter, Pseudomonas, Xanthomonas* et *Flavobacterium*) prédominent dans la rhizosphère du Blé var. *fylgia*, au moment du tallage, et y sont relativement plus abondantes que dans le sol témoin. C'est l'inverse qui se passe dans le cas des Bactéries sporulées (*Bacillus*), tandis que les formes ramifiées (*Arthrobacter, Nocardia, Mycoplana, Mycobacterium, Micromonospora* et *Streptomyces*), assez nombreuses, gardent un pourcentage à peu près constant. Il y a toujours très peu de coques (*Micrococcus, Sarcina*).

Le grand nombre de bâtonnets Gram négatifs appartenant au genre *Pseudomonas* ou à des genres voisins s'explique quand on connaît les propriétés des souches isolées dans la rhizosphère. En effet, CHAN et KATZNELSON (1961) démontrent que la prédominance des *Pseudomonadaceae* est due à trois facteurs au moins qui jouent séparément ou simultanément au sein de la rhizosphère : leur rapide taux de croissance accompagné d'une courte phase de latence, leur faculté de produire des substances acides au cours de leur métabolisme glucidique, et l'élaboration fréquente de pigments fluorescents qui sont souvent inhibiteurs vis-à-vis des *Arthrobacter* ou même d'autres Bactéries. Bien entendu, il ne faut jamais oublier que la mesure de l'effet rhizosphère est essentiellement comparative, et qu'on doit tenir compte des propriétés du sol témoin. Par exemple, les sols canadiens contiennent souvent un pourcentage important (45 p. 100) de souches appartenant au genre *Arthrobacter*, mais peu de Bactéries sporulées (7 p. 100). C'est le contraire que l'on observe dans les sols tchécoslovaques, où ces pourcentages respectifs représentent 7 p. 100 et 36 p. 100. Dans le cas du limon argileux utilisé dans notre expérimentation, on retrouve environ 36 p. 100 de Bactéries sporulées et 30 p. 100 de formes ramifiées. Malgré ces différences dans la constitution microbienne du sol éloigné ou témoin, la concordance des résultats expérimentaux est en faveur de l'affirmation de la prédominance des Bactéries Gram négatives dans la rhizosphère du Blé, quel que soit d'ailleurs l'âge de la plante, tout au moins jusqu'à la fin du tallage.

3. — *Répartition des groupes nutritionnels*

Bien que, vis-à-vis des substances nutritives, les rapports entre les plantes et les microorganismes du sol soient étroits (NILSSON, 1957), il n'apparaît pas, s'il s'agit du Blé (tableau 2), qu'il y ait des différences significatives dans les pourcentages des

divers groupes nutritionnels bactériens de la rhizosphère par rapport à ceux du sol éloigné. Cette répartition prête donc à discussion, puisqu'on observe quelquefois une stimulation des Bactéries nécessitant des acides aminés (LOCHHEAD et ROUATT, 1955) accompagnée d'une inhibition (LOCHHEAD, 1958) ou d'une stimulation (TARDIEUX et *al.*, 1961) des Bactéries nécessitant des facteurs de croissance, se traduisant par des modifications généralement importantes dans les pourcentages respectifs de ces divers groupes bactériens. Déjà WALLACE et KING (1954) n'avaient pas noté non plus de différences entre la rhizosphère et le sol éloigné ou témoin lorsqu'il s'agissait de cultures d'Avoine et d'Orge faites en plein champ, tandis que d'autres chercheurs, dont les conclusions n'étaient pas toujours concordantes, utilisaient des pots portés en serre (LOCHHEAD et ROUATT, 1955), voire des cultures hydroponiques (TARDIEUX et *al.*, 1961). Les auteurs n'emploient pas toujours le même milieu d'isolement, quoi qu'il s'agisse en général d'une gélose à l'extrait de terre plus ou moins enrichi en substances nutritives.

Une expérimentation très complète a été réalisée par EGDEL et *al.* (1960) pour comparer les différents milieux d'isolement préconisés dans diverses circonstances, aboutissant à conclure que le sol utilisé dans la préparation de l'extrait de terre importe peu à la condition d'avoir été cultivé et bien fumé, ce qui semble être le cas général. Si le milieu d'isolement n'est pas en cause, les conditions d'expérimentation jouent certainement un plus grand rôle. Il faut, dans la mesure du possible, standardiser les méthodes. La culture dans des pots, tout en respectant les conditions écologiques, limite l'hétérogénéité du prélèvement en plein champ. De plus, il est indispensable d'utiliser une terre de jachère sarclée, afin d'éviter les débris de végétaux plus ou moins métabolisés, et les particules d'engrais ou de fumier autour desquels se développent des microcolonies de germes zymogènes, provoquant des variations considérables dans les résultats obtenus (RIVIÈRE, 1960).

B. — PRODUCTION BACTÉRIENNE DE PHYTOHORMONES DANS LA RHIZOSPHÈRE DU BLÉ

Avant d'étudier cette production, il est bon de définir ce que l'on entend exactement par phytohormones, ce qui n'est pas facile, car il y a des interprétations nombreuses, diverses et parfois contradictoires du sens de ce dernier terme. Suivant PILET (1961), « *les phytohormones de croissance* sont des composés organiques, d'origine végétale, assurant, en concentration extrêmement faible, la régulation des processus de croissance et, en particulier, de l'élongation cellulaire. Parmi elles, les *auxines* correspondent à une classe de composés dont l'acide indole-3-acétique est le représentant le plus important, ces substances étant toutes de nature indolique ». Pour le même auteur, les *substances de croissance* sont des composés synthétiques, aux propriétés physiologiques comparables à celles des auxines, mais qui en diffèrent chimiquement. Bien que ces définitions paraissent plus claires que tout ce qui avait été écrit antérieurement, la distinction entre *phytohormones* et *substances de croissance* paraît discutable, même pour leur promoteur. Nous nous contenterons plus simplement de ranger sous le nom de *phytohormones* tous les composés actifs susceptibles de se comporter comme des *phytohormones de croissance* et produits au cours du métabolisme des Bactéries de la rhizosphère. Il existe un grand nombre de composés natu-

rels qui agissent directement ou indirectement sur la croissance des tissus ou des organes des plantes, et que l'on met en évidence au moyen de tests variés (PILET, 1961). Nous nous bornerons uniquement à rechercher les substances bactériennes capables de modifier l'élongation cellulaire, que l'on peut ranger dans le groupe des *auxines* ou dans celui des *gibberellines*. Le problème est alors considérablement simplifié, car les *auxines* agissent seulement sur l'élongation de fragments de tissu, comme des coléoptiles (GROVE, 1961, PILET, 1961) ; tandis que les *gibberellines* exercent leur action aussi sur des plantes intactes (BRIAN et *al.* 1960).

Étant donné que les Pois nains représentent le matériel le plus commode pour détecter les *gibberellines* (STOWE et YAMAKI, 1957 ; BRIAN et *al.*, 1960), l'emploi conjointement de deux tests biologiques pour éprouver les souches bactériennes isolées, l'un avec des fragments de tissu (croissance linéaire du coléoptile de Blé), l'autre avec des plantes entières (élongation des plantules de Pois nains), permet de mettre en évidence toutes les Bactéries de la rhizosphère productrices de phytohormones telles que nous les avons définies.

1. — *Isolement et caractérisation des Bactéries responsables*

On peut remarquer que cette dernière propriété est assez répandue parmi les Bactéries vivant dans la zone d'action des racines du Blé var. *fylgia*. En effet, au moment du tallage, parmi les 146 souches isolées de la rhizosphère, 29, soit 19,9 p. 100 libèrent des phytohormones décelées dans le filtrat de leurs cultures. En fait, l'action favorable de ces Bactéries sur l'élongation des plantules de Pois nains est discrète, fugace puisqu'elle disparaît après quelques repiquages, et pas du tout comparable à celle obtenue à l'aide d'une solution même très diluée d'acide gibberellique (S. E.A.B.). Dans le cas des essais réalisés à l'aide du filtrat de cultures bactériennes actives, l'élongation moyenne observée est supérieure à celle du témoin d'environ 10 p. 100. Alors qu'une seule vaporisation avec quelques millilitres d'une solution aqueuse d'acide gibberellique à 2 μg/litre provoque une augmentation de l'ordre de 100 p. 100. Par contre, les résultats obtenus sont beaucoup plus satisfaisants quand on détermine l'action des cultures bactériennes sur la croissance linéaire du coléoptile de Blé. Dans ce cas, le filtrat de la culture de certaines souches appartenant au genre *Pseudomonas* (9, 92) ou *Alcaligenes* (69), même dilué cent fois, a encore une activité notable (tableau 3). La propriété de produire des phytohormones n'est donc pas rare parmi les Bactéries de la rhizosphère, bien qu'elle ait été attribuée surtout à différentes souches du genre *Azotobacter* (SMALII et BERSHOVA, 1957 ; BURGER et BUKATSCH, 1958 ; BELTRA, 1959 ; VANCURA et MACURA, 1960). Or, l'action phytohormonale de ces dernières Bactéries ne doit pas être très efficace. En effet, *in vitro*, même quand on utilise le test des racines de Pois (LEOPOLD, 1955) qui sont très sensibles à de faibles doses d'auxines, il faut concentrer le filtrat des cultures pour obtenir un résultat positif (POCHON et BARJAC, 1958). D'ailleurs, si les *Azotobacter* ne sont jamais très nombreux dans la rhizosphère du Blé (RIVIÈRE, 1960), c'est qu'ils ne trouvent pas un milieu favorable au voisinage des racines, où le pH est trop acide par suite de l'excrétion de gaz carbonique ou d'acides organiques (VIGOROV, 1958 ; RIVIÈRE, 1960). Par contre, les bâtonnets Gram négatifs (tableau 1) et les Bactéries appartenant au genre *Pseudomonas* sont en plus grand nombre dans la rhizosphère que dans le sol

éloigné ou témoin (ROUATT et KATZNELSON, 1961), là où les racines sont susceptibles d'excréter du tryptophane (MARTIN, 1956) et du glucose (RIVIÈRE, 1960). On peut penser que toutes les conditions sont réunies pour qu'il y ait une synthèse bactérienne d'acide indole-3-acétique (STOWE, 1955).

2. — *Détermination de l'effet possible des Bactéries de la rhizosphère sur la croissance des racines du Blé*

Cependant, bien qu'un assez grand nombre de Bactéries isolées de la rhizosphère du Blé paraissent avoir une action phytohormonale, l'activité réelle des substances contenues dans le filtrat de leurs cultures doit être précisée sur la croissance même du Blé au voisinage des racines duquel elles se développent. Déjà, en 1942, SWABY démontra expérimentalement que des plants de Luzerne cultivés en présence de microorganismes avaient une taille deux fois plus grande que s'ils étaient laissés dans des conditions aseptiques. Plus tard, PANTOS (1956) découvrit que l'inoculation de huit souches bactériennes provenant de la rhizosphère du Blé stimulait à la fois la croissance des tiges et des racines de cette plante cultivée dans du sable imprégné d'une solution nutritive aseptique. Les microorganismes de la rhizosphère semblent agir aussi sur la morphologie et la croissance des racines du Pin (LEVISOHN, 1952), du Trèfle, du *Phalaris tuberosa* L. et de la Tomate (BOWEN et ROVIRA, 1961). Mais l'expérimentation de ces derniers auteurs ne fait pas intervenir de cultures pures, puisqu'ils inoculent le milieu gélosé où se développent aseptiquement de jeunes plantules avec une suspension de terre plus ou moins diluée. Dans ce cas, la croissance des racines est toujours fortement inhibée, mais les résultats présentent une grande variabilité d'un essai à l'autre, probablement par suite d'une interaction microbienne indéterminée. Quand on ajoute seulement une petite quantité du filtrat d'une culture pure dans un milieu minéral gélosé ensemencé avec un grain de Blé préalablement désinfecté, on observe parfois des modifications importantes dans la croissance des racines, se manifestant souvent par une sorte d'inhibition réduisant la longueur des racines, ou par des modifications plus complexes dans la longueur et le nombre des ramifications et des poils absorbants (tableau 8). Mais toutes les Bactéries capables d'exercer une action phytohormonale décelé par les deux tests biologiques (croissance linéaire du coléoptile de Blé et élongation des plantules de Pois nains) ne sont pas actives dans ces conditions. Parmi les 146 souches isolées de la rhizosphère du Blé var. *fylgia*, 9, soit 6,2 p. 100 seulement sont capables de modifier la croissance *in situ* des racines de cette plante dans les conditions expérimentales décrites. On sait que cette croissance est sous la dépendance de plusieurs facteurs, comme la teneur en eau, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, et la présence d'éléments nutritifs (TROUGHTON, 1957). Ces facteurs ne varient pas lors de l'expérimentation, étant donné que le filtrat des cultures éprouvées est toujours dilué dix à cent fois (essais) ou remplacé par la même quantité de milieu non ensemencé (témoins).

On peut donc raisonnablement estimer que ce sont bien des substances organiques produites par des microorganismes spécifiques de la rhizosphère du Blé qui sont responsables des modifications de la croissance des racines de cette plante. Fait à retenir, parmi ces Bactéries, on retrouve 57 p. 100 de bâtonnets Gram négatifs dont plus de la moitié appartiennent au genre *Pseudomonas* ou *Xanthomonas*. Comme on sait

(LOUW et WEBLEY, 1959) que la plupart des souches de ce genre sont capables de produire du 2-cétogluconate, substance jouant un grand rôle dans la solubilisation des phosphates, il apparaît que les Bactéries du genre *Pseudomonas* isolées dans la rhizosphère du Blé ont une grande importance à la fois dans la nutrition et la croissance des racines.

C. — CARACTÉRISATION DES SUBSTANCES ACTIVES

L'étude comparée des chromatogrammes et des biochromatogrammes de chaque filtrat de culture bactérienne avec ceux d'une solution pure d'acide indole-3-acétique permet d'avoir une idée de la structure de la substance active dans quelques cas. En effet, quand elle migre comme l'acide indole-3-acétique (Rf = 0,30), quand sa tache donne une même réaction colorée (GORDON et WEBER, 1951), et qu'elle provoque, après

TABLEAU 10

Biochromatogramme et caractérisation des substances de croissance au Rf 30 dans le filtrat des cultures bactériennes isolées de la rhizosphère et agissant sur la croissance des racines du Blé var *fylgia*

Groupe bactérien	N° des souches	Identification des souches	Test biologique (Rf 0,30)		Coloration au réactif de GORDON et WEBER	
			Milieu minéral glucosé I	Milieu minéral glucosé + DL tryptophane II	Rf	Intensité
Bâtonnets Gram négatifs	9	*Pseudomonas* sp	0	++	0,32	+++
	92	*Pseudomonas fluorescens*.....	0	+++	0,32	+++
	98	*Xanthomonas* sp.....	0	++	0,34	+++
	121	*Flavobacterium diffusum*.....	0	+	0,29	+++
Bactéries sporulées	73	*Bacillus megaterium* .	0	+	0,33	+++
Formes ramifiées	94	*Arthrobacter* sp.....	0	+	0,35	+++
	129	*Arthrobacter pascens* .	0	+	0,36	+

\+ intensité faible.
++ intensité moyenne.
+++ intensité forte.

élution, une élongation notable du mésocotyle d'Avoine (NITSCH, 1956), on peut penser, sans grand risque d'erreur, qu'il s'agit bien de cet acide. Ainsi, les résultats résumés dans le tableau 10 permettent de se rendre compte que la production bactérienne d'acide indole-3-acétique est possible, à la condition que le milieu de culture contienne du tryptophane. Ce qui, malheureusement, complique la caractérisation des substances actives. Car, même après avoir été stérilisé par filtration pour éviter une transformation en auxine sous l'action de la chaleur et de la pression, le tryptophane se sépare assez difficilement de l'acide indole-3-acétique, tout en se colorant aussi par le réactif de GORDON et WEBER (1951). Néanmoins, quand à la fois les résultats des chromatogrammes et des biochromatogrammes du filtrat des cultures concordent avec ceux d'une solution pure d'acide indole-3-acétique, on peut supposer que les Bactéries en question sont capables de synthétiser cet acide à partir du tryptophane. C'est ce qui se passe pour 24 p. 100 des souches productrices de phytohormones isolées dans la rhizosphère du Blé. Le fait que le filtrat de la culture des Bactéries paraissant synthétiser de l'acide indole-3-acétique aux dépens du tryptophane modifie la croissance des racines du Blé, cultivé aseptiquement dans un milieu minéral gélosé, est en faveur de cette hypothèse. En effet, les racines sont alors souvent courtes, épaisses, avec de gros poils absorbants, sans racines secondaires, comme dans le cas où l'on ajoute des auxines dans le milieu (voir fig. 1 et 2). Les souches responsables de cette modification sont aussi celles dont les filtrats de culture sont encore actifs à des dilutions élevées sur la croissance linéaire des coléoptiles de Blé, ou dont les biochromatogrammes à Rf 0,30 exercent l'action auxinique le plus forte sur les mésocotyles d'Avoine (NITSCH, 1955). Tous ces faits concordent pour étayer l'hypothèse d'une production bactérienne d'acide indole-3-acétique au sein de la rhizosphère. Quant aux autres Bactéries dont le filtrat des cultures favorise la croissance linéaire des coléoptiles de Blé, et qui représentent environ 76 p. 100 du nombre total des souches produisant des phytohormones, rien ne permet d'avoir une idée de la nature des substances responsables.

On peut alors se demander quel est le rôle des auxines bactériennes dans la rhizosphère sur la croissance de la plante. Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'essayer d'établir un bilan de l'auxinogenèse en recherchant s'il existe, dans la rhizosphère, des Bactéries capables de dégrader les auxines produites par d'autres germes. C'est ce qui fera l'objet d'une prochaine publication.

Reçu pour publication en février 1963.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. LABOUREUR et tous les collaborateurs de la S. E. A. B. (Jouy-en-Josas), ainsi que M. DEVILLERS (Établissements TRUFFAUT) et M. NITSCH, sous-directeur du Phytotron (Gif-sur-Yvette) pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée dans la réalisation de ce travail.

SUMMARY

THE RHIZOSPHERE AND GROWTH OF WHEAT

In the rhizosphere of wheat, var. *fylgia*, the distribution of nutritional groups of bacteria at the time of tillering does not significantly differ from that in the control soil. After devising a method of identification based on the work of SKERMAN (1959), it was found that the markedly predominating Gram negative bacteria belong to the following genera : *Alcaligenes*, *Erwinia*, *Achromobacter*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas* and *Flavobacterium*. On the other hand, the distant soil and controls contain a high proportion of strains of the genus *Bacillus* (table 1). There are several ways to explain the apparent contradiction between these results and those obtained by research workers in Canada (LOCHHEAD and ROUATT, 1955). The methods of studying the rhizosphere should be standardized as much as possible. There is a need for using bare fallow soil and to make pot cultures, since sampling in the field is unsatisfactory due the heterogeneity of the medium.

Among the strains isolated from the rhizosphere, there is a fairly high number of those producting growth hormones, as shown in the filtrate of their cultures. The two biological tests for these utilize the linear growth of wheat coleoptiles and the elongation of dwarf-pea seedlings. The bacterial action is very slight in the latter case, and rapidly disappears on sub-culturing. Identification showed that the most active bacteria are the Gram negative rods belonging to the genera *Pseudomonas* and *Alcaligenes* (table 6).

When testing the effect of the culture filtrate of these bacteria on the development of roots of wheat grown on mineral-agar medium under sterile conditions, it can be observed that only certain strains are effective (table 8). It should be noted that 57 p. 100 of these bacteria are Gram negative rods, most of them belonging to the genera *Pseudomonas* or *Xanthomonas*. Since these genera also play a role in the dissolution of phosphates (LOUW and WEBLEY, 1959), it seems that bacteria of the genus *Pseudomonas* in the rhizosphere of wheat have a great importance in the growth and nutrition of this crops.

It is experimentally shown that the organic substances produced by specific micro-organisms in the rhizosphere are the real cause of modifications in the root growth of wheat.

Chromatographic separation and biochromatograms of each culture filtrate justify the assumption that 3 - indole acetic acid is the responsible factor ; bacterial synthesis of this acid can only occur in presence of tryptophane.

ZUSAMMENFASSUNG

WURZELBALLEN UND WACHSTUM DES WEIZENS

Zur Zeit der Bestockung besteht im Wurzelballen des Weizens Sorte *Fylgia* keinerlei Unterschied in der Verteilung der bakteriellen Ernährungsgruppen und denjenigen des Kontrollbodens Nachdem der Autor eine Identifizierungsmethode, durch das Werk SKERMAN'S (1959) inspiriert. ausarbeitete, zeigt er eine klare Vorrangstellung der negativen Gram-Bakterien der folgenden Gattungen : *Alcaligenes*, *Erwinia*, *Achromabacter*, *Pseudomonas*, *Xanthemonas* und *Flavobacterium*. Der entfernter liegende Kontrollboden enthält hingegen eine grosse Anzahl Stämme der Gattung B*acillus* (TAF. 1) Um diesen scheinbaren Gegensatz zwischen diesen Resultaten und jenen der Kana dier (LOCHHEAD und ROUATT, 1955) zu erklären, können mehrere Gründe geltend gemacht werden. Die Untersu chungs thoden des Wurzelballens müssen so viel als möglich standardisiert werden. Verfasser legt Wert auf die Benutzung eines Brachbodens und von Topfkulturen, denn die Bodenproben im Felde sind infolge des heterogenen Bodens nicht ganz zufriedenstellend.

Unter den aus dem Wurzelballen isolierten Stämmen gibt es eine starke Anzahl solcher, die Pflanzenhormone erzeugen, was durch ihr Kulturfiltrat deutlich wird. Aus diesem Grunde werden zwei biologische Teste benützt, das lineare Wachstum des Weizenkoleoptils, und das Längenwachstum der Zwergerbsenkeimlinge. In letzterem Falle ist die bakterielle Wirkung sehr diskret und verschwindet rasch bei Unterkulturen. Nach Identifizierung bemerkt man, dass die aktivsten Bakterien die Gram-negativen Stäbchen der Gattungen *Pseudomonas* und *Alcaligenes* sind. (Taf. VI.)

Bei Betrachtung der Wirkung des Kulturfiltrats dieser Bakterien auf das Wurzelwachstum des

auf Mineral-agar-milieu aseptisch gezogenen Weizens bemerkt man dass nur gewisse Stämme wirksam sind (Taf. VIII) Und davon sind, was wichtig ist, 75 p. 100 Stäbchen der Gram-negativen, davon die Hälfte den Gattungen *Pseudomonas* und *Xanthomonas* angehörend. Da diese Bakterien auch in der Phosphatlöslichmachung eine Rolle spielen (LOUW und WEBLEY, 1959) zeigt es sich, dass die aus dem Weizenwurzelballen isolierten Bakterien der Gattung *Pseudomonas* für Pflanzenwachstum und-ernährung äusserst wichtig sind.

Verfasser beweist experimentell, dass es in der Tat die durch spezifische Mikroorganismen des Wurzelballens erzeugten organischen Sustanzen sind, die für das beobachtete Wachstum der Weizenwurzeln verantwortlich sind.

Nach chromatischer Trennung und Aufstellung eines Biochromatogramms für jedes Kulturfiltrat kann man vernünftigerweise annehmen, dass es sich wirklich um eine Indol-3-Essigsäure handelt. Aber die bakterielle Synthese dieser Säure beginnt erst mit Tryptophan.

РЕЗЮМЕ

Ризосфера и рост пшеницы.

С. РИВЬЕР (Национальный Сельскохозяйственный Институт.)

Распределение питательных групп бактерий в ризосфере вида *fylgia* во время кущения пшеницы ничем не отличается от их распределения в контрольной почве. Приложив идеи произведений Скермана (1959) для разработки метода идентификации, автор отмечает явное преобладание негативных бактерий Грама принадлежащих к видам : *Alcaligenes, Erwinia, Achromobacter, Pseudomonas, Xanthomonas,* и *Flavobacterium.* Отдаленные и контрольные почвы содержат напротив большие количества колоний вида *Bacillus* (Таблица I). Для раз'яснения очевидного противоречия этих результатов с результатами полученными канадской школой (Локхид и Руэтт 1956) можно было-бы привести самые различные об'яснения. Но, по мнению автора, необходимо прежде всего нормализировать по мере возможности методы изучения ризосферы. Автор настаивает на необходимости использования для опытов почв находящихся под черным паром, и выведения культур в сосудах, ибо по его мнению, полевые вытяжки не могут дать удовлетворительных результатов из за неоднородности среды.

Среди изолированных в ризосфере колоний находится довольно крупная пропорция колоний производящих фито-гормоны, которые можно выявить в фильтратах их культур. Для этого употребляют два биологических испытания : линевой рост колеоптиля и удлинение проростков карликового гороха. Надо однако заметить что во втором случае действие бактерий мало заметно и быстро исчезает при повторной культуре. После идентификации отмечается что наиболее активными бактериями являются негативные палочки Грама относящиеся к видам *Pseudomonas* и *Alcaligenes* (Таблица VI). Разсматривая действие культуры этих бактерий на рост корней пшеницы, культивируемой в асептической студенисто-минеральной среде, можно отметить что только некоторые из этих колоний эффективны (Таблица VIII). Автор замечает также что бактерии эти заключают 57 % негативных палочек Грама более половины которых относятся к видам *Pseudomonas* или *Xanthomonas*. А в виду того что палочки эти принимают также участие в растворении фосфатов (Лоу и Уэблей 1959), то становится очевидным, что бактерии вида *Pseudomonas* изолированные в ризосфере пшеницы имеют огромное значение для роста и питания этого растения.

Затем автор экспериментально доказывает что органическое вещество фабрикуемое специфическими микроорганизмами ризосферы действительно виновно в изменениях наблюдаемых при росте корней пшеницы.

После хроматографического разделения и реализации био-хроматограммы каждого фильтрата культуры, можно с достоверенностью предполагать, что речь идет действительно об индол-3-уксусной кислоте. Но бактериальный синтез этой кислоты может быть реализован только исходя от триптофона.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKHROMEIKO A. I., SHESTAKOVA V. A., 1957. Role of rhizosphere microorganisms in plant nutrition. *U. S. At. Energy Comm.*, A E. C. tr. **3376**, 99.

BARNES R. L., NAYLOR A. W., 1959. Effect of various nitrogen sources on growth of isolated roots of *Pinus serotina*. *Physiol. Plant.*, **12**, 82.

BEREZOVA F. F., NAUMOVA A. N., RASNIZINA E. A., 1938. Activité de l'Azotogène (en russe). *Dokl. Akad, Nauk. SSSR*, **18**, 357.

BELTRA R., 1959. β-indoleacetic acid and plant tumors of bacterial origin. *Rev. latinoam. Microbiol.*,**2**,23.a

BOWEN G. D., ROVIRA A. D., 1961. The effects of microorganisms on plant growth. I. Development of roots and root hairs in sand agar. *Plant and Soil*, **15**, 166.

BREED R. S., MURRAY E. G. D., NATHAN R. S., 1957. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 1904 p., 7e ed., Williams and Wilkins, Baltimore.

BRIAN P. W., GROVE J. F., MACMILLAN J., 1960. The gibberellins. In the : *Progress in the chemistry of organic natural products*, 351-433, Zechmeister ed., 18e vol. Wien, Springer-Verlag.

BROUCH F. K., 1960. A rapid microtechnique for determination of nitrate reduction by microorganisms. *J. Bacteriol.*, **60**, 365.

BURGER K., BUKATSCH F., 1958. Über die Wuchsstoff synthese im Boden frei lebender, stickstoffbinder Bakterien. *Zbl. Bakteriol.*, II. Abt., **111**, 1.

CHAN E. C. S., KATZNELSON H., 1961. Growth interactions of *Arthrobacter globiformis* and *Pseudomonas sp.* in relation to the rhizosphere effect. *Canad. J. Microbiol.*, **7**, 759.

CHOLODNY N. G., 1951. L'atmosphère du sol comme source d'aliments organiques pour les plantes (en russe). *Pochvovedenie*, **16**, 1.

CLARK F. E., 1949. Soil microorganisms and plant growth. *Adv. Agron.*, **1**, 241.

COOK F. D., LOCHHEAD A. G., 1959. Growth factors relationships of soil microorganisms as affected by proximity to the plant root. *Canad. J. Microbiol.*, **5**, 329.

EDGELL J. W., CUTHBERT W. A., SCARLETT C. A., THOMAS S. B., WESTMACOTT M. H., 1960. Some studies of the colony count technique for soil bacteria. *J. Appl. Bacteriol.*, **23**, 69.

EKDALH I., 1953. Studies on the growth and osmotic conditions of root hairs. *Symbolae botan. Upsaliensis* **11**, 1.

FALLOT J., 1958. Induction par *Bacillus megaterium* de la prolifération in vitro des tissus de tiges de *Vitis rupestris* prélevées pendant la période de repos végétatif. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 295.

FALLOT J., 1959. La prolifération in vitro du cambium dormant de *Vitis rupestris* provoquée par *Bacillus megaterium* dépend d'un facteur diffusible présent dans le milieu de culture de cette bactérie. *C. R. Acad, Sci.*, **248**, 2237.

FALLOT J., 1960. Prolifération in vitro des tissus de topinambours due à l'action de *Bacillus megaterium*. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1088.

FRAZIER W. C., 1926. A method for the detection of changes in gelatine due to bacteria. *J. Infect. Dis.*, **39**, 302.

GABY W. L., HADLEY C., 1957. Practical laboratory test for the identification of *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Bacteriol.*, **74**, 356.

GERRETSEN F. C., 1948. The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant* and *soil*, **1**, 51.

GIBSON J., 1957. Nutritional aspects of microbial ecology. *In Microbial ecology*, Cambridge University Press, New York.

GORDON S. A., WEBER R. P., 1951. Colorimetric estimation of indoleacetic acid. *Plant physiol.*, **26**, 192.

GROVE J. F., 1961. The gibberellins. *Quart. Rev. Chem. Soc. London*, **15**, 66.

GYLLENBERG H. G., 1957. Seasonal variation in the composition of the bacterial soil flora in relation to plant development. *Canad. J. Microbiol.*, **3**, 131.

HOFER A. W., 1941. A caracterization of *Bacterium radiobacter*. *J. Bacteriol.*, **41**, 193.

HOLDING A. J., 1960. The properties and classification of the predominant Gram negative bacteria occurring in soil. *J. Appl. Bacteriol.*, **23**, 515.

HUGH R., LEIFSON E., 1953. The taxonomic significance of fermentative versus oxidative metabolism of carbohydrates by various Gram-negative bacteria. *J. Bacteriol.*, **66**, 24.

INGRAM M., SHEWAN J. M., 1960. Introductory reflections on the *Pseudomonas-Achromobacter* group. J. *Appl. Bacteriol.*, **23**, 373.

KANDLER O., 1951. Papierchromatographischer Nachweis der Aminosäureausscheidung in vitro Kultivierter Maiswurzeln. *Z. Naturforsch.*, **66**, 437.

KAPER J. M., VELDSTRA H., 1958. On the metabolism of tryptophan by *Agrobacterium tumefaciens*. *Bio. chem. Biophys. Acta*, **30**, 401.

KATZNELSON H., BOSE B., 1956. Metabolic activity and phosphate dissolving capability of bacterial isolates from wheat roots, rhizosphere and non rhizosphere soil. *Canad. J. Microbiol.*, **5**, 79.

KATZNELSON H., ROUATT J. W., PAYNE T. M. G., 1955. The liberation of aminoacids and reducing compounds by plant roots. *Plant and soil*, **7**, 35.

KING E. O., WARD M. K., RANEY D. E., 1954. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein. *J. Lab. clin. Med.*, **54**, 301.

KLINGE K., 1957. Hämolyse und Hämoglobinablau durch Streptokokken und andere Bakterien. *Arch. Hyg. Bakteriol.*, **141**, 479.

KLINGE K., 1960. Differential techniques and methods of isolation of *Pseudomonas*. *J. Appl. Bacteriol.* **23**, 442.

LEOPOLD A. C., 1955. *Auxins and plant growth*. Univ. of California Press, Berkeley.

LEVISOHN I., 1952. Forking in pine roots. *Nature*, **160**, 715.

LOCHHEAD A. G., 1952. Soil Microbiology. *Ann. Rev. Microbiol*, **6**, 185.

LOCHHEAD A. G., 1958. Soil bacteria and growth promoting substances. *Bacteriol. Rev.*, **22**, 3.

LOCHHEAD A. G., ROUATT J. W., 1955. The rhizosphere effect on the nutritional groups of soil bacteria. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**, 48.

LOUW H. A., WEBLEY D. M., 1959. The bacteriology of the root region of the oat plant grown under controlled pot culture conditions. *J. Appl. Bacteriol.*, **22**, 216.

LOUW H. A., WEBLEY D. M., 1959. A study of soil bacteria dissolving certain mineral phosphate fertilizers and related compounds. *J. Appl. Bacteriol.*, **22**, 227.

MARTIN P., 1956. Recherches qualitatives et quantitatives sur l'excrétion de substances organiques par les racines *d'Avena sativa* (en allemand). *Naturwissenschaften*, **43**, 227.

NILSONN P. E., 1957. Influence of crop on biological activities in soil. *Kgl. Lantbrukshögsk. Ann.*, **23**, 175.

NITSCH J. P., 1955. Methods for the investigation of natural auxins. In : *Chemistry and mode of action of plant growth substances*, p. 3-31, Wain et Whightman ed., London.

NITSCH J. P., NITSCH C., 1956. Test for auxins. *Plant physiol.*, **31**, 94.

OBATON M., BLACHÈRE H., FERRY P., 1959. L'inoculation de la Luzerne. *Ann. agron.*, **30**, 69.

PANTOS G., 1956. Les formes principales des bactéries de la rhizosphère du blé, leurs propriétés physiologiques et leurs relations mutuelles avec la plante (en hongrois). *Magyar Tudom. Akad. Agrartudoma oszt.*, **9**, 315.

PAYNE T. M. B., ROUATT J. W., LOCHHEAD A. G., 1957. The relationship between soil bacteria with simple nutritional requirements and those requiring amino acids. *Canad. J. Microbiol.*, **3**, 73.

PILET P. E., 1961. *Les phytohormones de croissance*, 774 p., Masson ed., Paris.

POCHON J., 1954. *Manuel technique d'analyse microbiologique du sol.*, 1 vol., 123 p. Masson ed., Paris.

POCHON J., BARJAC H. de, 1958. Interactions entre la croissance des *Azotobacter* et celle du maïs. *Ann. Inst. Pasteur*, **94**, 419.

RIVIÈRE J., 1960. Étude de la rhizosphère du Blé. *Ann. agron.*, **11**, 397.

ROUATT J. W., KATZNELSON H., 1961. A study of the bacteria on the root surface and in the rhizosphere soil of crop plants. *J. Appl. Bacteriol.*, **24**, 164.

ROVIRA A. D., 1956. Plant root excretions in relation to the rhizosphere effect. I The nature of root exudate from oats and peas. *Plant and Soil*, **7**, 178.

ROVIRA A. D., BOWEN G. D., 1960. Effect of microorganisms on the development of roots and root hairs of subterraneum clover (*T. subterraneum*). *Nature*, **185**, 260.

SHEWAN J. M., HOBBS G., HODGKISS W., 1960. A determination scheme for the identification of certain genera of Gram-negative bacteria with special reference to the *Pseudomonadaceae*. *J. Appl. Bacteriol.*, **23**, 379.

SKERMAN V. B. D., 1959. *A guide to the identification of the genera of bacteria*, 1 vol., 217 p., Williams and Williams ed., Baltimore.

SMALLI U. T., BERSHOVA O. I., 1957. Formation d'hétéroauxines dans les cultures d'*Azotobacter* (en russe). *Mikrobiologija*, **26**, 526.

SPERBER I. J., ROVIRA A. D., 1959. A study of the bacteria associated with the roots of subterranean clover and Wimmera rye-grass. *J. Appl. Bacteriol.*, **22**, 85.

STARKEY R. L., 1958. Interrelations between microorganisms and plant roots in the rhizosphere. *Bacteriol. Rev.*, **22**, 154.

STILLE B., 1957. Schädigungen an Pflanzenwurzeln durch Kulturfiltrate von Mikroorganismen. *Arch. Mikrobiol.*, **26**, 71.

STOWE B. B., 1955. The production of indoleacetic acid by bacteria. *Biochem J.*, **61**, IX.

STOWE B. B. and YAMAKI T., 1957. The history and physiological action of the gibberellins. *Ann. Rev., Plant. Physiol.*, **8**, 181.

SWABY R. J., 1942. Stimulation of plant growth by organic matter. *J. Australian. Inst. Agr. Sci.*, **8**, 156.

TARDIEUX P., CHALVIGNAC A., CHARPENTIER M., LAJUDIE J., TARDIEUX A., POCHON J., 1961. Interactions microorganismes — Maïs en culture hydroponique aux premiers stades de croissance. *Ann. Inst. Pasteur*, **100**, 243.

TAYLOR C. B., 1951. The nutritional requirements of the predominant bacterial flora of the soil. *Proc. Soc. Appl. Bacteriol.*, **14**, 101.

THORNLEY M. J., 1960. Computation of similarities between strains of *Pseudomonas* and *Achromobacter* isolated from chicken meat. *J. Appl. Bacteriol.*, **23**, 395.

TOLLE R., RIPPEL-BALDES A., 1958. Untersuchungen über die Rhizosphäre von Gramineen. *Zbl. Bakteriol. Ablt.* II, **111**, 204.

TROUGHTON A., 1957. The underground organs of herbage grasses. *Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, Bulletin*, **44**.

VAGNEROVA K., MACURA J., CATSKA A., 1960. Rhizosphere microflora of wheat. *Folia microbiol.*, **5**, 298.

VANCURA V., 1961. Detection of gibberellic acid in *Azotobacter* cultures. *Nature*, **192**, 88.

VANCURA V., MACURA J., 1960. Indole derivatives in *Azotobacter* cultures. *Folia microbiol.*, **5**, 293.

VIGOROV L. I., 1958. Les facteurs conditionnant la présence des *Azotobacter* dans les sols podzoliques et dans la rhizosphère du blé (en russe). *Mikrobiologija*, **27**, 89.

VOZNIAKOVSKAIA I. M., ZHIL'TSOVA G. K., 1958. Composition spécifique de la microflore de la rhizosphère de quelques plantes (en russe). *Mikrobiologija*, **27**, 611.

WALLACE R. H., KING H. de L., 1954. Nutritional groups of soil bacteria on the roots of barley and oats. *Soil Sci. Am. Proc.*, **28**, 282.

WESTMACOTT M. H., 1960. Some studies of the colony count technique for soil bacteria. *J. Appl. Bacteriol*, **23**, 69.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 655-742

TRANSPIRATION VÉGÉTALE ET PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE. ESSAI D'INTERPRÉTATION EN FONCTION DES FACTEURS DU MILIEU

S. DE PARCEVAUX

Station centrale de Bioclimatologie agricole,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

L'influence de l'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée sur la physiologie des plantes, et plus particulièrement sur la production de matière sèche dans les conditions naturelles, est étudiée à partir de la synthèse d'un grand nombre de résultats d'origine très diverse. L'étude comparée des phénomènes physique et biologique de l'évaporation E et de la transpiration T conduit à la notion de transpiration relative T/E. L'influence des interactions complexes de la transpiration relative avec les autres facteurs écologiques et notamment avec le gaz carbonique sur la production végétale est enfin analysée.

PLAN

INTRODUCTION 656

CHAPITRE 1. — *Étude physique de l'eau au niveau de la plante* 658

11. État de l'eau dans la plante
    111. Teneur en eau. Turgescence relative
    112. Potentiel de l'eau
12. Dynamique de l'eau à travers la plante
    121. Différence de potentiel
    122. Résistances au passage de l'eau
        1221. à l'état liquide
        1222. à l'état vapeur
13. Formules concernant l'action des facteurs climatiques

CHAPITRE 2. — *Évaporation* 676

21. Rayonnement net
22. Influence du déficit de saturation
23. Influence de la température
24. Influence de la vitesse du vent
25. Mesure de l'évaporation

CHAPITRE 3. — *Transpiration* 682

31. Transpiration cuticulaire
32. Transpiration stomatique
    321. Facteurs hydriques
    322. Facteurs photiques
        3221. Le rayonnement
        3222. Le gaz carbonique
        3223. La température
        3224. Conséquences
    323. Mesure des stomates
    324. Stomates et transpiration
33. Méthodes de mesure de la transpiration
    331. Classification écologique et examen critique
    332. Description d'une méthode écologique utilisable.
34. Résultats

CHAPITRE 4. — *Relation entre la transpiration et l'évaporation* 702

41. Transpiration ou débit maximal
42. Transpiration relative T/E
    421. Analyse d'un cas particulier
    422. Correction d'albédo
    423. Correction de température
    424. Transpiration relative corrigée (ε_φ)
43. Variations de la transpiration relative

CHAPITRE 5. — *Production de matière sèche. Assimilation nette ou apparente* .. 713

51. Complexes climatiques
    511. Expérimentations en conditions naturelles et contrôlées.
    512. Étude succincte de quelques complexes
52. Mesure de la photosynthèse apparente
    521. Méthodes
    522. Résultats
53. Facteurs limitants de la photosynthèse
    531. Lumière et température
    532. Gaz carbonique
        5321. Action du gaz carbonique sur la photosynthèse
        5322. Variations climatiques de la teneur en CO_2.
54. Facteur eau et photosynthèse
    541. Évaporation, facteur limitant de la photosynthèse
    542. Efficience de la transpiration
        5421. Définition
        5422. Variations
        5423. Intérêt
    543. Efficience stomatique

CONCLUSIONS *Conséquences scientifiques et agronomiques* 733

INTRODUCTION

Des considérations sur le spectre d'absorption de la lumière ont amené certains chercheurs (WILLCOX, 1959 ; NOFFSINGER, 1962 ; NICHIPOROVICH, 1962) à penser qu'au maximum, 20 à 25 p. 100 de l'énergie solaire incidente pourrait théoriquement être

transformée en énergie chimique pour aboutir finalement à la production de matière sèche. En fait, les cultures n'utilisent actuellement qu'une fraction beaucoup plus faible du rayonnement disponible. WILLCOX (1959) a estimé que la luzerne pouvait transformer 0,7 p. 100 de la radiation reçue, le maïs 0,93 p. 100, le riz 1,2 p. 100, la canne à sucre de 1,5 à 3,9 p. 100. L'efficacité de l'utilisation de l'énergie d'origine solaire par les cultures est donc limitée par des conditions étrangères à l'absorption elle-même. L'intervention d'un seul facteur, s'il est limitant, suffit à freiner sinon à arrêter le processus de l'assimilation chlorophyllienne : si la température est trop basse, les réactions photosynthétiques sont fortement ralenties ; quand elle est suffisante, ce sera la teneur en gaz carbonique ou l'alimentation minérale ou l'eau qui constituera alors le facteur limitant principal. Pour atteindre le maximum théorique, il faudrait pouvoir maintenir toutes les conditions, sans aucune exception, à l'optimum, ce qui n'a encore jamais été réalisé pour une culture.

Les conditions écologiques subies par les plantes au cours de leur croissance ont par conséquent une profonde influence sur la quantité de matière sèche formée ; la qualité en dépend aussi dans une large mesure, mais nous n'aborderons pas ce problème dans la présente étude. Parmi les facteurs écologiques dont l'action est souvent déterminante, l'eau tient une place privilégiée : l'eau est une nécessité vitale et, s'il existe quelques régions où elle est surabondante, elle constitue généralement le facteur limitant primordial de la production végétale.

Le but de notre étude est de dégager les relations entre la production de matière sèche et le facteur eau et d'analyser certaines interactions entre les différents facteurs écologiques dont dépend l'activité photosynthétique. Sans méconnaître l'action des autres facteurs, nous envisagerons plus spécialement celle des facteurs d'ordre climatique qui nous paraît essentielle dans l'état actuel des techniques.

Pour aborder ce problème sous un jour nouveau, il était nécessaire d'émettre une nouvelle hypothèse de départ ayant des bases physiques et climatologiques et non pas seulement biologiques : elle sera empruntée dans le cadre des travaux de recherches en équipe effectuées à la Station centrale de Bioclimatologie de Versailles, à notre collègue R. J. BOUCHET (1963) qui en fait par ailleurs dans ce même numéro la discussion fondamentale. Cette étude sera donc axée sur l'influence de l'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée sur la physiologie des plantes et particulièrement sur la production de matière sèche ; elle sera illustrée de nombreux résultats bibliographiques et personnels dont nous nous efforcerons de faire la synthèse.

Les relations entre le sol et la plante ne seront envisagées que dans la mesure où leur connaissance est indispensable à la compréhension des phénomènes qui se produisent au contact de la plante et de l'atmosphère. Les conditions de fertilisation notamment seront supposées optimales.

CHAPITRE I

ÉTUDE PHYSIQUE DE L'EAU AU NIVEAU DE LA PLANTE

L'activité vitale des plantes supérieures exige une grande quantité d'eau. En fait, un très faible pourcentage de celle-ci est réellement assimilé par l'intermédiaire des processus photosynthétiques. La teneur en eau totale d'une plante à un instant donné est faible si on la compare à la quantité d'eau qui passe à travers le végétal durant vingt-quatre heures ; les feuilles, même à l'ombre, peuvent remplacer la totalité de leur eau en moins d'une heure (MAXIMOV, 1929). L'eau absorbée par les plantes a donc trois rôles principaux : la plus grande partie sert à assurer la transpiration et à amener les éléments minéraux nécessaires à la vie de la plante ; une faible partie maintient l'hydratation des cellules et enfin une quantité relativement très faible entre dans la composition de la matière sèche formée. Nous étudierons ici les deux aspects correspondant aux consommations d'eau les plus importantes, c'est-à-dire, l'état de l'eau dans les tissus et la dynamique de l'eau à travers la plante.

II. — ÉTAT DE L'EAU DANS LA PLANTE

L'état de l'eau dans la plante peut s'exprimer simplement par la teneur en eau ou d'une façon plus rigoureuse, par le potentiel thermodynamique de l'eau.

III. *Teneur en eau — Turgescence relative*

Les teneurs en eau des organes végétaux en pleine activité vitale sont toujours assez élevées, de l'ordre de 500 à 1 000 p. 100 du poids sec. La photosynthèse dépend de cette teneur en eau ; elle décroît rapidement lorsque le déficit en eau dépasse une certaine valeur, 25 p. 100 du poids à saturation dans le cas du Lierre (tabl. 1).

TABLEAU I

(d'après Mme BRILLIANT, 1924)

Déficit en eau en % du poids à saturation ...	5-15	15-25	31-40	41-52	53-65
Quantité de CO_2 absorbée	127,4	142,0	37,0	1,5	1,4

Pour le maïs (MAXIMOV 1929), la teneur en eau des feuilles est de 804 p. 100 à pleine turgescence ; au point de flétrissement permanent, elle est de 472 p. 100 ce qui représente un déficit de 40 p. 100. Pour le haricot, les valeurs correspondantes sont de 694 p. 100 et de 486 p. 100, soit un déficit de 30 p. 100 au point de flétrissement (MAXIMOV, 1929). Les teneurs en eau compatibles avec une bonne activité photosynthétique sont peu différentes de la teneur à saturation ; toute l'eau contenue dans la plante lui est nécessaire et ne constitue pratiquement aucune réserve qui lui permettrait par exemple de passer un moment de sécheresse difficile. Ainsi, en admettant que le maïs puisse comme le lierre céder 25 p. 100 (voir tabl. 1) de son eau sans trop de dommages, un hectare de cette culture en plein développement représente au maximum une dizaine de tonnes de matière sèche et donc environ 80 m³ d'eau ; les 25 p. 100 de cette eau, soit 20 m³ (ou encore une hauteur d'eau égale à 2 mm), ne nécessitent en été que quelques heures pour être entièrement évaporés. En fait, cette valeur constitue un maximum et il suffit en général de quelques dizaines de minutes pour épuiser cette eau de réserve qui n'a, par conséquent, qu'un faible pouvoir tampon.

La façon d'exprimer les résultats des mesures de teneur en eau est une question délicate : faut-il la rapporter au poids frais ou au poids sec ? En fait, le poids frais comme le poids sec sont sujets à des variations journalières selon les conditions climatiques. Le poids sec varie avec l'intensité de la photosynthèse et la vitesse de translocation des produits formés. Le poids frais varie avec l'intensité de la transpiration (fig. 1). Il semble toutefois que le poids sec soit relativement plus constant

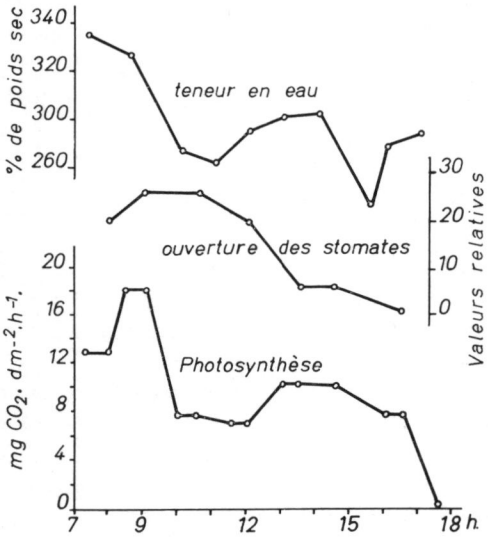


FIG. 1. — *Variations de la teneur en eau, de l'ouverture des stomates (au poromètre) et de la photosynthèse du coton à Alexandrie* (d'après SAAD, 1954)

que le poids frais et surtout il ne fluctue qu'indirectement avec le facteur eau. Il serait donc préférable d'exprimer la teneur en eau en fonction du poids sec. Ces inconvénients ont incité les chercheurs à trouver une autre façon de représenter l'eau contenue dans les feuilles : ils l'ont appelée la turgescence relative.

La turgescence relative (TR) est le rapport exprimé en pourcentage de la quantité d'eau contenue dans un tissu donné au moment de l'échantillonnage, à la quantité d'eau contenue dans le même tissu à pleine turgescence ; ceci s'écrit :

$$TR = 100 \frac{PF - PS}{PT - PS}$$

en appelant PF, le poids frais, PS, le poids sec, et PT, le poids à pleine turgescence, Ce dernier est assez délicat à obtenir et dépend des conditions expérimentales qui doivent être standardisées ; c'est pourquoi cette mesure ne donne pas entièrement satisfaction.

Ces divers modes d'expression de l'état de l'eau dans la plante restent descriptifs et ne rendent compte qu'assez imparfaitement de la réalité physique.

112. — *Potentiel de l'eau*

Il est intéressant pour représenter l'état de l'eau dans la plante de s'appuyer sur une notion purement physique susceptible de s'appliquer non seulement à la plante, mais à tous les milieux contenant de l'eau. Grâce à cette continuité, les comparaisons entre le sol, la plante et l'atmosphère seront grandement simplifiées. La thermodynamique peut, sans complications inutiles nous semble-t-il, donner une réponse à ce problème. De ce point de vue en effet, l'état de l'eau se caractérise par le travail mis en jeu quand l'unité de masse d'eau (1 gramme) passe de l'état de référence (eau libre) à l'état considéré. Ce travail correspond en toute rigueur à une différence d'enthalpie libre (= *free energy*) ; on l'appelle aussi potentiel.

Le potentiel ψ de l'eau peut s'exprimer de différentes manières qui sont toutes identiques (TAYLOR et SLATYER, 1962).

$$\psi = V\Delta P = RT \operatorname{Log} \frac{p_0}{p} = 10{,}497\ T \log \frac{100}{e}.$$

R est la constante des gaz parfaits relative à un gramme de vapeur d'eau, T la température absolue, p_0/p la fugacité relative de l'eau qui est pratiquement égale au rapport des pressions de vapeur d'eau réelle p et maximale p_0, e l'humidité relative, V le volume spécifique de l'eau (= 1 $cm^3 . g^{-1}$), ΔP une différence de pression que l'on a pris l'habitude d'appeler dans les plantes pression de succion (P_s) ou déficit de pression de diffusion (DPD) ; dans une solution, ΔP sera la pression osmotique (P_o). Pour le sol, on utilise la notion de potentiel matriciel ou potentiel capillaire : le pF du sol est le logarithme décimal de la valeur absolue du potentiel exprimé en g·cm. Ces diverses expressions représentent une même réalité physique, l'état de l'eau.

Si les pressions sont exprimées en atmosphères, les potentiels le seront en atmosphères·centimètres cubes (atm·cm^3). Le volume spécifique de l'eau V étant d'un centimètre cube par gramme (1 $cm^3 . g^{-1}$), les potentiels seront donc numériquement égaux dans ce cas aux pressions. L'atmosphère est une unité commode qui présente l'avantage d'être couramment employée par les biologistes.

(1 atm = 1,013 bars = 1,013 × 10^6 dynes. cm^{-2} ≈ 1 033 cm d'eau)

Dans une cellule vivante et en première approximation, à l'état statique, la pression de succion P_s est la somme algébrique de la pression osmotique P_o du suc vacuolaire, qui, négative, tend à faire pénétrer l'eau des milieux extérieurs hypotoniques dans la cellule et de la pression mécanique positive P_m exercée en sens inverse par la membrane et qui tend à chasser l'eau de la cellule (fig. 2).

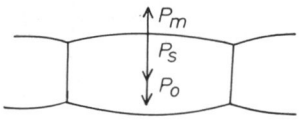


FIG. 2. — *Les pressions dans la cellule* (orig.)

$$P_s = P_o + P_m$$

La pression P_s est généralement négative, c'est sa valeur absolue que l'on considère. Si la membrane est détendue, $P_m = 0$ et $P_s = P_o$; P_s est alors appelée pression osmotique de plasmolyse-limite. Si une telle cellule plasmolysée est mise dans un liquide hypotonique, sa pression osmotique P_o décroît légèrement en valeur absolue, par contre, sa pression mécanique P_m croît, donc P_s, la pression de succion, décroît en valeur absolue ; elle atteint zéro si la solution hypotonique est de l'eau pure et à condition que la cellule n'éclate pas.

Dans les tissus végétaux, la pression de succion varie généralement, du moins en climat tempéré, de 0 à environ 20 atm ; dans le sol, le potentiel de l'eau doit être inférieur à 15 atm·cm³ pour permettre la survie de la plupart des plantes étudiées en agronomie : c'est le point de flétrissement permanent. Dans l'air, le potentiel de l'eau sera, à 17°C de 20 atm·cm³ pour une humidité relative de 98,6 p. 100, de 500 atm·cm³ pour une humidité de 69 p. 100 et de 1 500 atm·cm³ pour une humidité de 32 p. 100 (fig. 3).

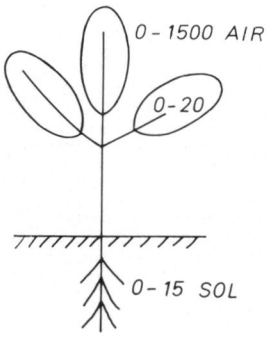


FIG. 3. — *Répartition des potentiels en atm·cm³* (orig.)

La circulation de l'eau se fera bien entendu, des potentiels élevés (0 atm·cm³ pour l'eau pure) aux potentiels les plus bas (— 1 500 atm·cm³ pour l'air ; les chiffres donnés plus haut correspondaient aux valeurs absolues). Il convient de noter qu'il suffira d'une différence de potentiel de 10 atm·cm³ pour permettre à la sève d'atteindre la cime d'un arbre haut de cent mètres ; l'ascension de la sève dans les grands arbres ne pose donc aucun problème d'ordre énergétique.

Il existe une relation entre les grandeurs physiques qui viennent d'être définies et les grandeurs étudiées dans le paragraphe précédent : ce ne sont que des expressions différentes de la même réalité ; ainsi la relation entre le déficit de pression de diffusion (DPD) ou pression de succion et la turgescence relative (fig. 4 *a* et *b*) présente un certain intérêt. En réalité, les phénomènes vitaux ne sont pas compatibles avec

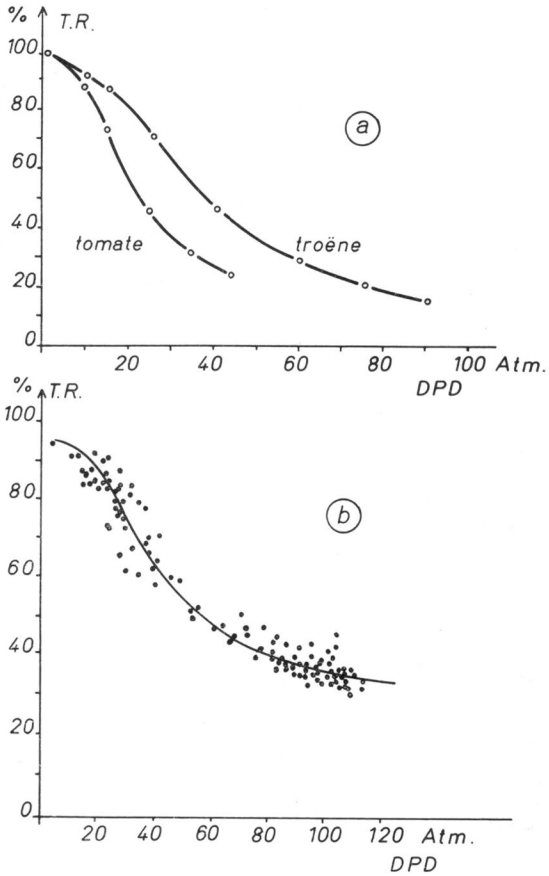


FIG. 4 *a*. — *Relation entre la turgescence relative et le DPD dans le tissu foliaire du Troëne et de la Tomate* (d'après SLATYER, 1961)
FIG. 4 *b*. — *Relation entre la turgescence relative et le DPD dans les phyllodes* d'Acacia aneura (d'après SLATYER, 1961)

les valeurs élevées du DPD, pour lesquelles le déficit en eau devient trop important (tabl. 1) ; en ce qui concerne les problèmes agronomiques habituels, seules les valeurs inférieures à une vingtaine d'atmosphères doivent être prises en considération.

12. — DYNAMIQUE DE L'EAU A TRAVERS LA PLANTE

Les échanges des fluides (eau et vapeur d'eau, gaz carbonique, oxygène) entre la plante et le milieu ambiant obéissent aux lois de la dynamique des fluides (cf. HAL-

LAIRE, 1963, chap. 4). Ainsi, le débit q à un instant donné peut s'écrire :

$$q = \lambda \frac{\Delta\psi}{\Delta x}$$

$\Delta\psi$ est la différence de potentiel entre les extrémités du trajet de longueur Δx et de conductance λ, suivi par le fluide. La notion de résistance R étant plus familière que celle de conductance, on peut poser :

$$\lambda = \frac{1}{R}$$

d'où

$$q = \frac{\Delta\psi}{R.\Delta x}$$

ce qui peut encore s'écrire :

$$\Delta\psi = q \cdot R \cdot \Delta x.$$

En électricité, l'intensité du courant (ou débit) est généralement définie à partir d'une différence de potentiel donnée. Au contraire, en hydrodynamique, dans le cas présent, le débit q est variable et commande en se conformant à la formule précédente, les différences de potentiel entre chaque niveau.

Or, si le potentiel au niveau de la feuille ne peut dépasser une certaine valeur, il s'ensuivra que le débit à travers la plante sera limité. Nous verrons par la suite toute l'importance de ce phénomène de débit limite.

L'équation précédente, valable pour l'ensemble du parcours de l'eau du sol jusqu'à l'atmosphère par l'intermédiaire de la plante, peut s'appliquer à chaque portion de ce parcours. Ce ne sera plus la résistance globale R qui sera prise en considération, mais la résistance partielle r propre à chaque élément de ce trajet. Bien entendu, la résistance totale est la somme des résistances partielles (MILTHORPE, 1962).

121. — *Différence de potentiel*

On a vu plus haut (cf. § 111) qu'il n'existe pratiquement pas dans le végétal de zone d'accumulation d'eau constituant une réserve importante ; le flux à travers la plante peut donc être considéré comme conservatif et la répartition des potentiels (fig. 3) peut donner un aperçu de l'importance des résistances partielles à la diffusion de l'eau. Pour un débit q donné, STOCKER (1930) trouve une différence de déficit de pression de diffusion de deux à sept atmosphères entre le sol et les racines. GRADMANN (1928), EDLEFSEN (1941) et VAN DEN HONERT (1948) estiment que la résistance au mouvement de l'eau entre la cellule et l'air est au moins vingt fois plus importante que la résistance totale entre le sol et les racines et à travers la plante ; la différence de potentiel $\Delta\psi$ est en effet très grande entre la feuille et l'air. En fait, il faut distinguer deux types de résistances : d'une part, les résistances opposées à la diffusion de l'eau à l'état liquide (sol-plante) d'autre part, les résistances à la diffusion de l'eau à l'état de vapeur (plante-atmosphère).

122. — *Résistances au passage de l'eau*

1221. — *A l'état liquide.*

A l'état liquide, dans la plante, les endroits où la résistance sera maximale (r grand) correspondent aux passages de l'eau à travers les parois cellulaires dont

les pores sont de l'ordre de l'angström ; bien que ces parois soient minces (x petit), pour un débit q donné, leur présence entraîne une chute de potentiel $\Delta\psi$ très supérieure à la chute de potentiel dans les vaisseaux dont le diamètre, de l'ordre du micron, est au moins mille fois plus grand et où la résistance r est par conséquent plus faible.

Le fait qu'il existe généralement une très faible différence de déficit de pression de diffusion entre les racines et les feuilles justifie ce point de vue.

Entre le sol et la plante, la chute de potentiel est plus importante mais reste toutefois relativement faible (au maximum 20 atm.cm³) si on la compare à celle existant entre la plante et l'air, qui dépasse fréquemment un millier d'atmosphères. centimètres cubes.

1222. — *A l'état vapeur.*

Comme pour toute surface évaporante, c'est au niveau de la feuille que l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation considérable de volume ; dans les conditions naturelles, comme le montre la loi des gaz parfaits (PV = RT), un gramme d'eau occupe une volume de l'ordre de cinquante à soixante mille centimètres cubes. Cette expansion de chaque gramme d'eau évaporée exige l'absorption d'un certain nombre de calories correspondant à la chaleur latente de vaporisation L donnée par la formule de CLAPEYRON

$$L = \frac{T}{J}\,(U_{vap} - U_{liq})\,\frac{dp}{dT}$$

(U_{vapeur} - $U_{liquide}$) représente la variation de volume précédente, dp/dT est la pente de la courbe représentant les tensions maximales de vapeur d'eau en fonction de la température, J est l'équivalent mécanique de la calorie.

Cette vapeur d'eau doit être évacuée de la feuille dans l'air ambiant. La présence d'un solide crée une discontinuité et un obstacle aux déplacements naturels de l'air. L'influence d'un tel obstacle se fait sentir à une distance relativement importante (fig. 5) ; dans la zone affectée et pour des surfaces telles que les feuilles des végétaux, la turbulence naturelle de l'air est supprimée ; il y a seulement écoulement laminaire de masses gazeuses. Cette zone s'appelle couche limite laminaire vraie. On peut définir une couche limite laminaire équivalente d'épaisseur Δz (BOUCHET et RIOU 1960, BOUCHET 1963) dans laquelle tout se passerait comme si les échanges avaient lieu à l'échelle moléculaire.

Cette représentation simplifiée des phénomènes permet d'appliquer à la couche limite les lois classiques de la physique concernant la diffusion moléculaire des gaz (vapeur d'eau, gaz carbonique, oxygène) et le transport de la chaleur. Un bilan énergétique simple, basé sur des données d'observation courante (BOUCHET et RIOU, 1960) donne l'ordre de grandeur de cette couche limite équivalente qui est voisine d'un millimètre. Cette épaisseur est fonction de la vitesse du vent (voir fig. 15), de la rugosité et des coefficients de forme et de dimension de l'organe étudié. Ces notions d'aérodynamique permettent de calculer la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau au-dessus d'une surface évaporante.

Dans le cas des feuilles, le problème est moins simple car la surface évaporante n'est pas homogène ; si une quantité d'eau non négligeable passe à travers la cuticule,

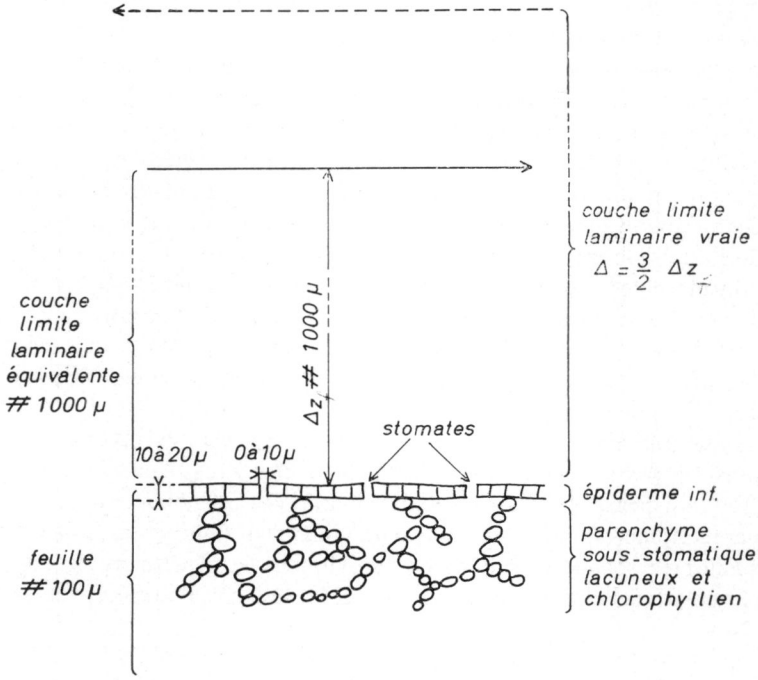


FIG. 5. — *Représentation schématique des couches laminaires au-dessus d'une feuille* (orig.)

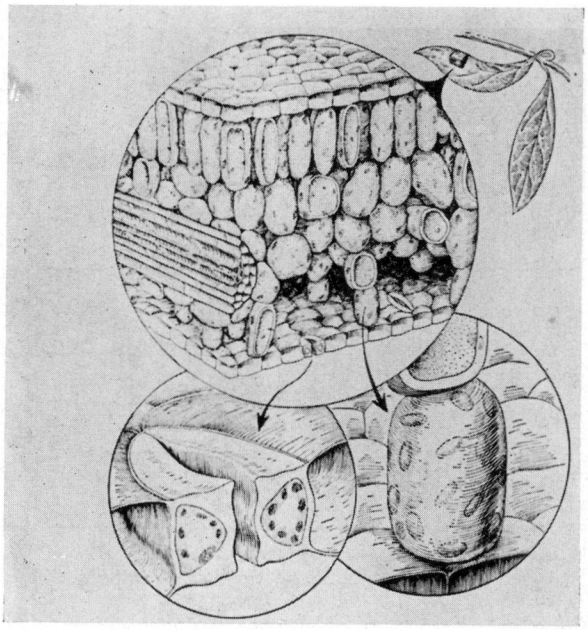


FIG. 6. — *Représentation schématique d'une coupe de feuille hypostomatique* (d'après BONNER et GALSTON, 1952)

la majeure partie de l'eau transpirée par une feuille emprunte généralement la voie stomatique quand les stomates sont ouverts.

La transpiration cuticulaire a lieu par toute la surface de la feuille ; il lui correspond une diffusion dans la couche limite de type plan comme au-dessus d'une surface totalement évaporante. La transpiration cuticulaire n'est qu'une fraction plus ou moins importante (0 à 30 p. 100 environ selon les espèces végétales) de l'évaporation d'une surface équivalente totalement évaporante. Le calcul de la diffusion de la vapeur d'eau dans la couche limite ne présente pas de difficulté particulière, mais l'intérêt de l'étude de cette transpiration réside dans ses variations interspécifiques qui sont considérables. Nous étudierons cette question en détail plus loin.

Dans le cas de la transpiration stomatique, le calcul de la diffusion de la vapeur d'eau devient beaucoup plus complexe. Divers auteurs (STÅLFELT 1932, HUBER 1928, BANGE 1953, MILTHORPE 1962) ont essayé de résoudre ce problème avec plus ou moins de succès.

Une bonne connaissance de l'anatomie du milieu physique traversé par la vapeur d'eau depuis les parois cellulaires du tissu lacuneux sous-stomatique jusqu'à l'air extérieur est indispensable à la compréhension de ces phénomènes.

Le parenchyme sous-épidermique est constitué d'un tissu assez lâche ; les diverses chambres sous-stomatiques communiquent largement entre elles, si bien que leurs limites sont mal définies ; par contre, la surface évaporante représentée par

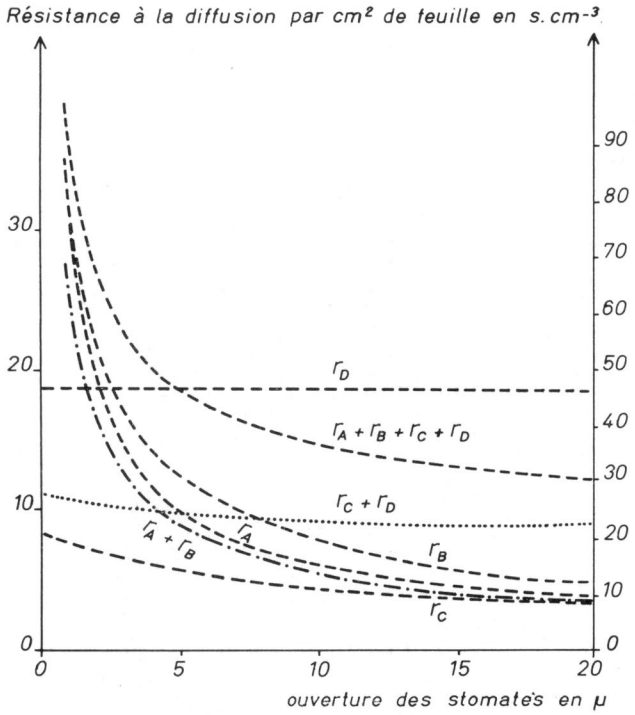


FIG. 7. — *Valeurs théoriques des résistances à la diffusion en relation avec l'ouverture des stomates (en μ). L'ordonnée de gauche s'applique aux résistances séparées. Celle de droite, aux résistances combinées. Résistances* (r_A) *de la cavité sous-stomatique,* (r_B) *du stomate,* (r_c) *de la « microcup » de vapeur (zone de diffusion divergente) et* (r_D) *de la couche limite partielle (zone de diffusion plane)* (d'après BANGE, 1953)

les parois cellulaires est considérable ; elle est plusieurs fois plus grande que la surface foliaire (fig. 6).

BANGE (1953) distingue dans la transpiration stomatique quatre types différents de résistances à la diffusion en phase gazeuse : r_A correspond à la résistance des cavités sous-stomatiques, r_B à celle des stomates, r_C à celle de la zone de la couche limite proche des stomates où la diffusion est divergente et r_D à celle de la zone de la couche limite où la diffusion peut être considérée comme plane. L'auteur calcule la résistance r_A en supposant une cavité sous-stomatique sphérique, ce qui semble assez peu correspondre à la réalité et y inclut une partie de la résistance des stomates ; c'est pourquoi la résistance r_A de la cavité sous-stomatique varie comme la résistance r_B des stomates (fig. 7). Par ailleurs, il considère que la couche limite est supprimée par le vent, ce qui est aérodynamiquement impossible (fig. 15). Ces hypothèses l'ont conduit, semble-t-il, à reporter dans les cavités sous-stomatiques les résistances r_C et r_D qu'il avait supprimées avec la couche limite et également une partie de la résistance r_B des stomates. A notre avis, l'importance de la surface évaporante et des méats sous-épidermiques permet une bonne diffusion de la vapeur d'eau et dans cette zone, la résistance à la diffusion est relativement faible. Il est important de noter que la vapeur émise au niveau d'une cavité sous-stomatique peut parfaitement s'évacuer par les stomates voisins. Bien entendu, lorsque la vitesse du vent augmente, la résistance r_D de la zone extérieure de la couche limite diminue avec l'épaisseur de cette dernière ; par contre, la résistance r_C de la zone de diffusion divergente reste pratiquement constante et devient donc relativement importante. A ces remarques près concernant la résistance r que nous considérons comme pratiquement nulle et la vitesse du vent, nous avons retrouvé grâce à des expériences effectuées sur la base d'analogies électriques (travaux non publiés), les ordres de grandeur relatifs présentés par BANGE, spécialement en ce qui concerne les résistances r_C et r_D de la couche limite et r_B des stomates. Les résultats présentés sur la figure 8 sont valables non seulement par temps calme, mais quelle que soit la vitesse du vent u, si l'on prend soin de faire varier la résistance r_D de la couche limite comme la racine carrée de cette vitesse (cf § 24).

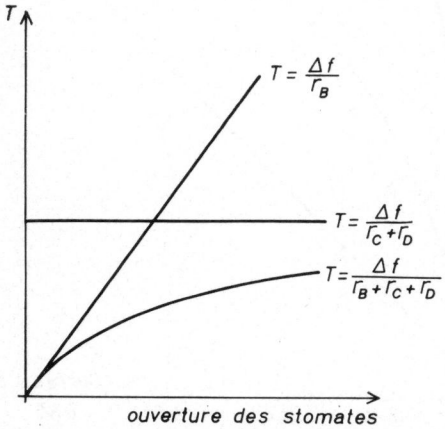


FIG. 8. — *Relation entre le taux de transpiration T et l'ouverture des stomates déterminée d'après les valeurs relatives de la résistance dans les stomates* (r_B), *la couche limite totale* ($r_C + r_D$) *et l'ensemble* ($r_B + r_C + r_D$) Δf *est le déficit de saturation entre la feuille et l'air* (adapté de BANGE, 1953)

Les stomates jouent un rôle privilégié dans la transpiration : en se fermant et en s'ouvrant, ils modifient la vitesse des échanges gazeux entre le parenchyme lacuneux sous-épidermique et la couche laminaire limite extérieure. Même totalement ouverts, les stomates ne représentent qu'un faible pourcentage de la surface totale de la feuille (tabl. 2). Près des trois quarts des espèces végétales possèdent des surfaces stomatiques inférieures à 1,5 p. 100 de la surface foliaire totale. Malgré cela,

TABLEAU 2

Répartition d'un certain nombre d'espèces végétales en fonction du pourcentage de la surface stomatique maximale rapportée à la surface foliaire totale
(D'après Weiss, 1890, SIERP et SEYBOLD, 1929)

Surface stomatique en % de la surface foliaire	Fréquences en % sur les épidermes		
	Supérieurs	Inférieurs	
0,1-0,5	49	21,5	72,6 %
0,6-1,0	31	30,1	
1,1-1,5	14	21,0	
1,6-2,0	6	13,7	
2,1-2,5		4,6	
2,6-3,0		5,8	
3,1-3,6		3,2	

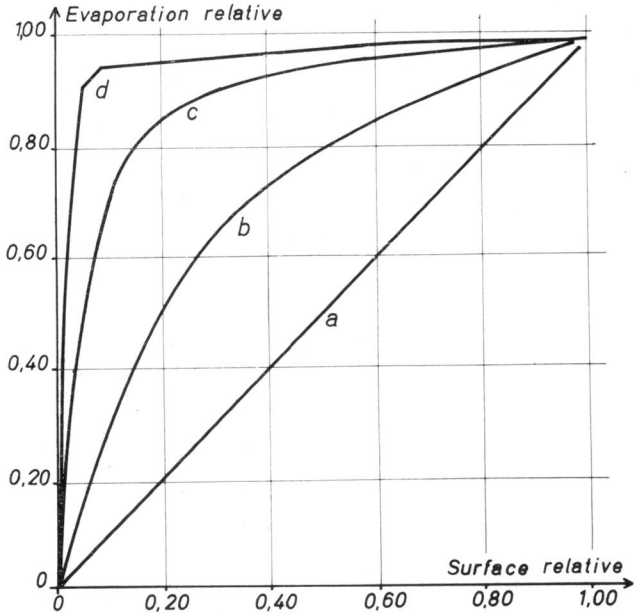


FIG. 9. — *Relation entre l'évaporation d'une surface perforée rapportée à celle d'une surface totalement évaporante en fonction de la surface des pores rapportée à la surface totale pour des pores de* 1 *cm*² (b), 1 *mm*²(c), 2 000 μ² (d). *La diagonale* (a) *représente la proportionnalité des surfaces* (d'après HUBER, 1928)

une feuille dont la transpiration cuticulaire est faible devant la transpiration stomatique et dont les stomates sont pleinement ouverts, peut perdre presque autant d'eau qu'une même surface totalement évaporante (voir ci-dessous fig. 18 et 38).

HUBER (1928), SIERP et SEYBOLD (1929) et BANGE (1953) ont étudié le problème de l'évaporation à travers des membranes multiperforées. HUBER (1928) notamment a obtenu les résultats indiquées sur la figure 9. Il en découle qu'un très faible pourcentage de surface évaporante suffit à alimenter la couche limite à la condition que les trous soient suffisamment petits : la dimension des pores (2 000 μ^2) relatifs à la courbe *d* correspond à une dimension supérieure à la dimension maximale des stomates. Lorsque ces derniers sont pleinement ouverts, on peut donc bien affirmer que la résistance au flux de vapeur a lieu presque uniquement dans la couche limite. BANGE (1953) explique ce phénomène par une diffusion sphérique au niveau de chaque stomate, qui permettrait un débit relativement important. Les expériences citées ci-dessus concernant les analogies électriques nous ont conduit à des conclusions identiques.

TABLEAU 3

Dimensions de l'appareil stomatique, nombre de stomates et longueur des nervures par unités de surface
(D'après PISEK et CARTELLIERI, 1932)

Espèces	Forme	Nombre de stomates par mm²			Dimensions de l'appareil stomatique en μ	Longueur des nervures en mm par cm²
		Dessus	Dessous	Total		
Stachys recta	Soleil	77	270	347	28 × 19	1 290
Leontodon incanus	—	104	210	314	29 × 19	660
Coronilla varia	—	137	123	260	25 × 16	850
Oxytropis pilosa	—	40	140	180	23 × 17	945
Rhammus pumila	—	11	153	164	44 × 27 dessus 38 × 20 dessous	420
Sedum maximum	—	36	72	108	32 × 21	310
Lamium galeobdolon	Ombre	0	125	125	26 × 17	411
Mercurialis perennis	—	0	63	63	34 × 22	342
Asarum europaeum	—	0	47	47	48 × 33	307
Oxalis acetosella	—	0	37	37	28 × 19	172
Cynanchum vincetoxicum.	Soleil	0	178	178	25 × 19	789
Cynanchum vincetoxicum.	Ombre	0	152	152	26 × 19	688
Buphthalmum salicifolium	Soleil	65	82	147	33 × 28	630
Buphthalmum salicifolium	Ombre	29	47	76	33 × 23	367
Impatiens noli tangere	Soleil	31	251	282	19 × 12 dessus 23 × 13 dessous	593
Impatiens noli tangere	Ombre	0	100	100	20 × 13	340
Pulmonaria officinalis	Soleil	0	104	104	37 × 24	268
Pulmonaria officinalis	Ombre	0	57	57	36 × 37	192

Par contre, lors de la fermeture des stomates, le calcul montre que la résistance à la diffusion dans ceux-ci croît d'abord lentement puis, pour des ouvertures d'environ un micron de large, atteint l'ordre de grandeur de la résistance dans la couche limite équivalente ; elle croît ensuite très rapidement et devient infinie pour la fermeture

complète ; dès lors, la transpiration stomatique s'annule. C'est dans ces conditions qu'interviennent plus spécialement la morphologie de la feuille, le nombre de stomates, leur dimension, leur position (tabl. 3, 4, 5, 6).

TABLEAU 4

Nombre moyen de stomates par mm² de feuille (d'après FERRY et WARD, 1959)

Espèces	Épiderme supérieur	Épiderme inférieur	Total
Maïs	52	68	120
Blé	33	14	47
Avoine	25	23	48
Haricot	40	281	321
Pomme de terre	51	161	212
Tomate	12	130	142
Chou	141	226	367
Pommier	0	294	294
Pêcher	0	225	225
Cerisier	0	249	249
Noyer noir	0	461	461
Chêne-Saule	0	723	723
Coleus	0	141	141
Géranium	19	59	78

TABLEAU 5

Classement de 319 *plantes, dont* 125 (39 *p.* 100) *étaient amphistomatiques, d'après le nombre de stomates par mm²* (dans LEICK, 1927, calculé d'après WEISS, 1890)

Classement Nombre de stomates par mm²	% de plantes dans chaque catégorie	% de plantes à feuilles amphistomatiques à l'intérieur de chaque catégorie
1-100	29,4	60
100-200	28,8	35
200-300	22,6	36
300-400	10,3	27
400-500	3,4	9
500-600	2,5	12
600-700	1,9	0
700-800	0,6	0
800-900	0,0	0
900-1 000	0,3	0

Les succulentes mises à part, les plantes réagissent à la sécheresse de l'air (plantes de soleil par rapport aux plantes d'ombre) ou à la sécheresse du sol (fig. 10) en réduisant la dimension de leurs cellules et par conséquent de leurs stomates : par contre-

coup, la densité stomatique à l'unité de surface s'accroît. Une telle réaction est efficace, car, comme on l'a vu plus haut, la résistance à la diffusion dans les pores croît très rapidement lorsque diminuent leurs dimensions : la régulation du flux de vapeur est ainsi beaucoup mieux assurée. Ce phénomène s'accompagne souvent d'un épaississement et d'une imperméabilisation de la cuticule. Enfin, les stomates sont parfois

TABLEAU 6

Nombre moyen de stomates pour différents groupes de plantes
(dans STÅLFELT, 1956, d'après SALISBURY, 1927, FIRBAS, 1931 et EVENARI, 1938)

Groupe de plantes	Nombre de stomates par mm²
Xérophytes non succulents au désert ...	129
Plantes de marécages en altitude	114
Plantes de lisière forestière	83
Plantes d'eau et de marécages	61
Plantes d'ombre en forêt	46
Succulentes au désert	45

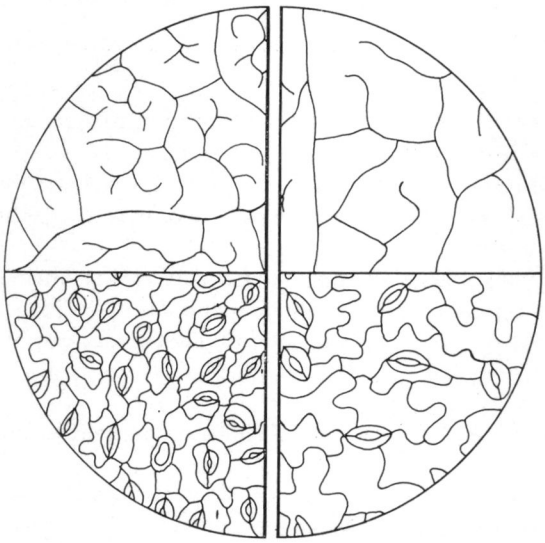


FIG. 10. — *Épidermes supérieurs (en haut) et inférieurs (en bas) de feuilles de Haricots* (Phaseolus vulgaris) ; *à gauche, sur sol relativement sec, à droite, témoin* (d'après TUMANOV, 1927)

enfouis dans des cryptes stomatiques (fig. 11) ; l'épaisseur de la couche limite équivalente s'en trouve alors augmentée. La pilosité qui recouvre un grand nombre de feuilles joue un rôle analogue en accroissant la rugosité de la surface.

En résumé, on peut dire que, à l'exclusion de la circulation cuticulaire, les résistances à la diffusion de l'eau à l'état liquide dans la plante sont faibles, si on

les compare aux résistances à la diffusion de l'eau à l'état de vapeur dans les stomates et la couche limite équivalente. La résistance dans les chambres sous-stomatiques est négligeable devant la résistance dans les stomates ouverts ; cette dernière est elle-même de l'ordre du dixième de la résistance à la diffusion dans la couche

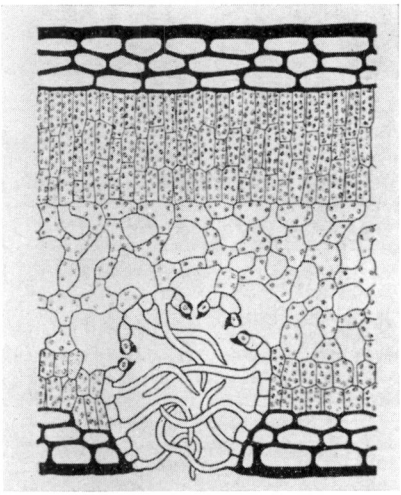


FIG. 11. — *Coupe d'une feuille de Laurier-rose* (d'après STOCKER, 1952)

limite ; la hiérarchie de ces ordres de grandeur montre que la résistance dans la couche limite équivalente est, dans ce cas, de beaucoup la plus grande de toutes les résistances à la diffusion de l'eau dans la plante. La surface foliaire se comporte alors presque comme une surface totalement évaporante : cette hypothèse est d'ailleurs pleinement confirmée par l'expérience.

Lors de la fermeture des stomates, phénomène très fréquent, la résistance à la diffusion dans ces derniers devient vite prépondérante et joue avec la résistance cuticulaire un grand rôle dans l'adaptation des plantes aux conditions de sécheresse.

13. — *Formules concernant l'action des facteurs climatiques*

Quand les stomates sont bien ouverts, la transpiration peut être considérée comme un phénomène purement physique ; comme l'évaporation, elle est limitée par l'énergie.

Ce sont les facteurs du climat qui règlent seuls la quantité d'eau émise. En écrivant l'équation du bilan d'énergie au niveau d'une surface telle qu'une feuille, il devient possible d'établir des formules (BOUCHET, 1963) qui permettent d'expliciter l'action des divers facteurs climatiques sur la transpiration et même sur l'assimilation chlorophyllienne.

Dans le cas d'une surface totalement évaporante, telle qu'une rondelle de papier buvard humide (pastille d'évaporomètre Piche), placée dans les mêmes

conditions microclimatiques qu'une feuille et qui pourra servir de modèle physique de référence, BOUCHET (1963) donne l'expression suivante :

$$\mathrm{ETP} = \mathrm{E} = \frac{\mathrm{R}_n + \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{F}'(\theta)\mathrm{LD}}} = \frac{\mathrm{R}_n + \dfrac{\Delta f \cdot u^{0,5}}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\Gamma(l)}}{1 + \dfrac{1}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{LD}}} \tag{1}$$

avec :

$$\Delta z_f = \Gamma_f(l^{1/2}, u^{-1/2}) = \Gamma(l).u^{-0,5}.$$

ETP ou E désignent l'évapotranspiration potentielle ponctuelle ;
R_n désigne le rayonnement net de la surface considérée qui dépend de son albédo a ;
Δf désigne le déficit de saturation ;
$\mathrm{F}'(\theta)$ désigne la dérivée de la fonction de tension maximum de vapeur d'eau $\mathrm{F}(\theta)$. θ est la moyenne entre les températures de la surface évaporante et du point de rosée ;
β désigne une constante représentant le rapport entre les épaisseurs des couches limites laminaires équivalentes relatives à la température et à la vapeur ;
K désigne le coefficient de conductibilité moléculaire de la chaleur pour l'air sec ;
D désigne le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air ;
L désigne la chaleur latente de vaporisation de l'eau ;
Δz_f désigne l'épaisseur de la couche limite équivalente relative à la vapeur ;
u désigne la vitesse du vent ;
Γ (l) désigne le coefficient de forme et de dimension de l'organe étudié.

Les différents facteurs du climat qui interviennent sont donc : le rayonnement (R_n), la température dans le terme [$\mathrm{F}'(\theta)$], le déficit de saturation (Δf), la vitesse du vent (u). L'organe lui-même intervient par sa forme, sa dimension [Γ (l)] et son albédo (a) dont dépend le rayonnement net.

L'évapotranspiration réelle ponctuelle ETR ou transpiration T d'une feuille sera généralement différente de l'évapotranspiration potentielle ETP ou évaporation E d'un modèle physique tel qu'il vient d'être défini. BOUCHET (1963) introduit un coefficient ε, inférieur ou égal à l'unité, tel que :

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon\ \mathrm{ETP}$$

ε exprime les différentes causes de divergence entre la transpiration et l'évaporation. Elles sont essentiellement d'ordre physiologique, thermique, colorimétrique, morphologique et hydrique, ce qui permet d'écrire :

$$\varepsilon = \varepsilon_\varphi \cdot \varepsilon_\theta \cdot \varepsilon_a \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_{he}.$$

ε_{he} traduit les influences d'ordre hydrique, c'est-à-dire l'abaissement de l'humidité relative en équilibre (loi de RAOULT), liée à la pression de succion de l'eau au niveau de la surface évaporante de la feuille. En fait, au-dessus du point de flétrissement, ε_{he} est très voisin de l'unité ($\varepsilon_{he} = 1$).

ε_m traduit les influences d'ordre morphologique sur l'épaisseur Δz_f de la couche limite (forme et dimension de l'organe, pilosité...) et sur la diffusion dans cette même couche limite (discontinuité de la surface évaporante due à la présence des stomates) ; l'état d'ouverture des stomates est un phénomène d'ordre physiologique. Nous avons vu ci-dessus (§ 1222) que la discontinuité de la surface évaporante n'introduisait qu'une résistance négligeable à la diffusion de la vapeur d'eau.

Si la feuille et le modèle physique de référence ont une morphologie semblable, ε_m sera égal à l'unité. Cette hypothèse sera admise dans la suite.

ε_a traduit les influences d'ordre colorimétrique (albédo) sur le bilan énergique. ε_a sera égal à l'unité si l'albédo est le même pour toutes les longueurs d'onde.

ε_θ traduit les influences d'ordre thermique dues à l'élévation de température consécutive à une diminution de la transpiration par suite de l'intervention de la régulation stomatique. Ce phénomène tend à freiner cette diminution de la transpiration et réduit par conséquent l'efficacité de la régulation physiologique. ε_θ est supérieur ou égal à l'unité.

ε_φ traduit les influences d'ordre physiologique (régulation stomatique et cuticulaire) dont il vient d'être question, en admettant que les températures de surface soient les mêmes. Cette dernière condition est hypothétique, mais il est possible de calculer ε_φ en tenant compte de la température comme on le verra ci-dessous. ε_φ sera voisin de l'unité lorsque les stomates seront tout à fait ouverts ; il traduira la part de la transpiration cuticulaire quand ils seront fermés ; cette dernière est elle-même susceptible d'une certaine régulation due au tassement des parois épidermiques et de la cuticule lorsque le desséchement s'accentue (*incipient drying*).

En introduisant ce facteur ε_φ, il devient possible d'exprimer l'évapotranspiration réelle ponctuelle ETR de la même manière que ETP (Bouchet, 1963), soit :

$$\mathrm{ETR} = \mathrm{T} = \frac{\mathrm{R}_n + \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{F}(\theta)}}{1 + \dfrac{1}{\varepsilon_\varphi} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{F}'(\theta)\mathrm{LD}}} = \frac{\mathrm{R}_n + \dfrac{\Delta f \cdot u^{0,5}}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\Gamma(l)}}{1 + \dfrac{1}{\varepsilon_\varphi} \cdot \dfrac{1}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{LD}}} \tag{2}$$

T sera nul pour $\varepsilon_\varphi = 0$

En admettant l'identité complète des surfaces évaporantes et transpirante au point de vue thermique, colorimétrique, morphologique et hydrique, c'est-à-dire $\varepsilon_\varphi = \varepsilon_a = \varepsilon_m = \varepsilon_{he} = 1$, on peut définir une transpiration relative T/E, qui représentera pratiquement la réaction physiologique de la feuille à l'ensemble des facteurs du climat intégrés dans ce rapport.

T/E n'est pas simplement égal, comme on pourrait le croire, à ε_φ. En effet, la réduction de la transpiration provoquée par la fermeture des stomates a pour effet d'élever la température de la feuille et par là même la transpiration T. Le calcul conduit à l'expression :

$$\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{E}} = \varepsilon_\varphi \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \varepsilon_\varphi \lambda(\theta)} \text{ en posant } \frac{\mathrm{LD}}{\mathrm{K}\beta} \cdot \mathrm{F}'(\theta) = \lambda\,(\theta) \tag{3}$$

ou encore :

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\mathrm{T/E}}{1 + \lambda(\theta)(1 - \mathrm{T/E})}\,. \tag{3'}$$

Cette expression montre que T/E est égal à l'unité pour $\varepsilon_\varphi = 1$ (stomates ouverts), mais qu'à mesure que ε_φ diminue, T/E diminue moins vite que ε_φ (voir fig. 37).

La production de matière sèche ou photosynthèse apparente (Ass) est également sous la dépendance des facteurs climatiques d'où la formule :

$$\mathrm{Ass} = \mathrm{C} \cdot \Phi(\mathrm{Rg}) \cdot \Delta p \, \frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} = \frac{\mathrm{C} \cdot \Phi(\mathrm{Rg}) \cdot \Delta p \cdot \varepsilon_\varphi \cdot u^{0,5}}{\Gamma(l)} \tag{4}$$

Φ (R_g) représente la partie du rayonnement global (R_g) directement utilisable par la photosynthèse.

Δp représente l'écart de pression partielle de gaz carbonique entre l'air ambiant extérieur à la couche limite et les parois cellulaires. On notera que la photosynthèse dépend entre autres, du coefficient de forme et de la vitesse du vent.

Il est maintenant intéressant de voir comment peut s'exprimer l'efficience de la transpiration. Après simplification, BOUCHET obtient :

$$\frac{\text{Ass.}}{\text{T}} = \text{C} \cdot \Phi(\text{Rg}) \frac{\varepsilon_\varphi + \dfrac{\text{K}\beta}{\text{LDF}'(\theta)}}{\dfrac{\text{R}_n \cdot \Gamma(l)}{u^{0,5}} + \Delta f \dfrac{\text{K}\beta}{\text{F}'(\theta)}} \Delta p. \tag{5}$$

L'efficience de la transpiration dépend manifestement des conditions climatiques et ne peut être constante pour une variété donnée. Par contre, grâce à ses fluctuations, elle peut constituer un indice d'adaptation de chaque variété aux conditions du milieu.

Il se dégage de la formule (4) une autre notion qui nous semble présenter un certain intérêt :

$$\frac{\text{Ass.}}{\varepsilon_\varphi} = \frac{\text{C} \cdot \Phi(\text{Rg}) \cdot \Delta p \cdot u^{0,5}}{\Gamma(l)}. \tag{6}$$

Cette « efficience stomatique » fait clairement apparaître l'action des facteurs essentiels du milieu sur les réactions physiologiques dont dépend finalement l'assimilation apparente. ε_φ peut se calculer à partir du rapport T/E (3').

Bien entendu, ces formules ne traduisent pas toute la réalité ; en particulier elles ne font pas explicitement apparaître les facteurs liés au sol : alimentation en eau et alimentation minérale ; mais ils y sont implicitement contenus. En plus des conditions physiques et physiologiques de passage de l'eau à travers la plante, ε_φ peut en effet dépendre des conditions d'absorption de l'eau par les racines dans le sol : en sol sec, ε_φ aura tendance à être plus faible qu'en sol humide. Par ailleurs, l'alimentation minérale agira sur la production de matière sèche.

Dans le présent article, nous supposerons les conditions telles que les facteurs climatiques figurant dans les formules précitées sont les facteurs limitants de premier ordre, ce qui est très souvent le cas dans les cultures de plein champ.

Sans oublier que ces formules ne sont que des hypothèses de travail, elles vont servir de canevas pour les chapitres suivants. Dans la mesure du possible, les résultats expérimentaux les plus valables à notre sens seront rappelés et discutés ; les méthodes de mesure les plus aptes à rendre compte de la réalité biologique dans les conditions naturelles seront présentées.

Chapitre II

L'ÉVAPORATION

Dans ce chapitre, on ne prétend en aucune manière donner une vue exhaustive du problème de l'évaporation ; seules, quelques notions indispensables à la bonne compréhension des chapitres suivants y seront présentées.

En principe, le rayonnement d'origine solaire est le terme essentiel dont dépend l'évaporation, surtout si l'on se place à une échelle assez vaste (Bouchet, 1963) ; les autres facteurs climatiques n'en sont que des conséquences. En fait, dans le cas présent, à l'échelle du microclimat ponctuel, à cause de l'hétérogénéité du milieu et de l'inertie des phénomènes, la répartition de l'énergie apportée plus ou moins directement par le rayonnement ne peut plus être considérée comme uniforme dans l'espace, ce qui était statistiquement valable à grande échelle. Dès lors, à petite échelle, tout se passe comme si les différents facteurs du climat agissaient d'une façon indépendante : l'étude séparée de chacun des facteurs d'action devient nécessaire.

L'évaporation ou évapotranspiration potentielle ponctuelle, correspondant à la « demande » au niveau de la feuille peut donc bien s'exprimer par la formule (1) rappelée ci-dessous :

$$E = \frac{R_n + \frac{K\beta}{\Gamma(l)} \cdot \frac{\Delta f \cdot u^{0,5}}{F'(\theta)}}{1 + \frac{1}{F'(\theta)} \cdot \frac{K\beta}{LD}}. \qquad (1)$$

Cette formule met en évidence les différents facteurs qui contribuent à provoquer l'évaporation. Dans cette expression, quatre termes méritent d'être étudiés : le rayonnement net R_n, la vitesse du vent u, le déficit de saturation de l'air Δf et la température θ.

21 — Rayonnement

Le rayonnement net résulte du bilan suivant :

$$R_n = (1 - a)\ R_g + R_a - R_t$$

a est l'albédo, c'est-à-dire le pouvoir réflecteur de la surface considérée ;
R_g est le rayonnement global [1]
R_a est le rayonnement atmosphérique
$R_t = \sigma T^4$ est le rayonnement propre de la surface réceptrice.

[1] Pour mémoire, nous indiquerons la correspondance entre les différentes unités couramment employées dans la mesure du rayonnement :
1 cal. cm^{-2}. mn^{-1} = 1 langley. mn^{-1} = 69,7 mW. cm^{-2} = 69, 7 · 10^4 ergs · cm^{-2} · s^{-1}

Pour le rayonnement global, en été et par ciel clair, l'équivalent lumineux de la calorie varie de 32 700 Lux pour une hauteur du soleil de 10° au-dessus de l'horizon à 60 500 lux pour 30° et 69 900 lux pour 60° (d'après Dogniaux, 1954).

Ce rayonnement varie dans le temps et dans l'espace. Plusieurs chercheurs ont estimé ou mesuré ses variations : l'exemple classique d'ALBRECHT à Potsdam donne une idée de ce que peuvent être les variations du bilan radiatif au cours de la journée (fig. 12). Plus récemment, SLATYER (1961) a publié un autre exemple de mesure du

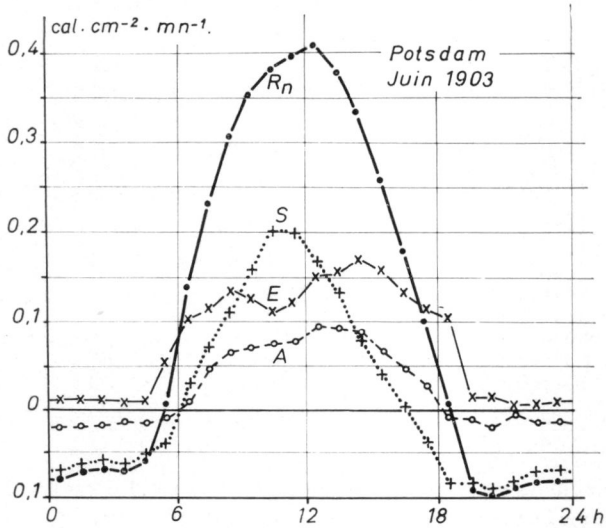


FIG. 12. — *Évolution de l'évaporation calculée d'après le bilan d'énergie, à Potsdam par une journée de beau temps. La dépression de midi visible sur la courbe d'évaporation E correspond à la fermeture des stomates. R_n, rayonnement net, S, énergie absorbée par le sol, A, énergie absorbée par l'air, E, évaporation calculée* (dans HUBER 1956, d'après ALBRECHT)

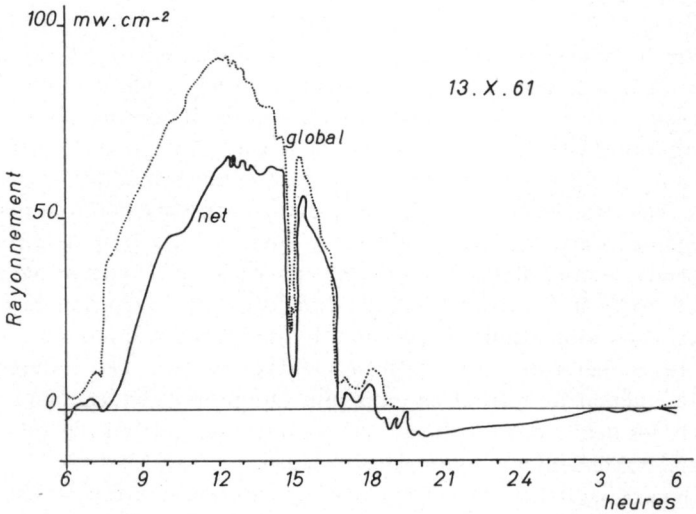


FIG. 13. — *Enregistrement typique des rayonnements global et net à Aspendale (Australie) ; le rayonnement net est mesuré sur gazon* (d'après SLATYER, 1961)

rayonnement net en Australie (fig. 13). PENMAN (1951) a pu calculer comment était transformée l'énergie reçue sous forme de rayonnement global et atmosphérique (tabl. 7).

TABLEAU 7

Bilan énergétique de mai à septembre (inclus) 1949 en Grande-Bretagne
(d'après PENMAN, 1951)

	% de l'énergie totale reçue	Évaporation équivalente approximative en mm
Croissance	1	10
Réchauffement du sol	2	20
Réchauffement de l'air	4	40
Réflexion	20	180
Rayonnement réémis	34	310
Transpiration	39	350

Le rayonnement net varie donc beaucoup au cours du temps. A petite échelle, dans l'espace, les variations pourront être également très importantes selon la nature, l'orientation et la position de l'organe étudié dans la masse végétale. La demande en eau au niveau de chaque feuille présentera des fluctuations correspondantes dans le temps et l'espace.

22. — INFLUENCE DU DÉFICIT DE SATURATION

Le déficit de saturation Δf correspond à la différence entre la tension maximum de la vapeur d'eau à la température de l'air et la tension réelle (tension maximum de la vapeur d'eau à la température du point de rosée). Il est généralement admis que cette dernière varie assez peu au cours de la journée lorsque le temps est stable, c'est-à-dire, s'il n'y a pas de modification dans la composition des masses d'air. En fait, il y a souvent une légère variation de la température du point de rosée le matin et le soir (fig. 14). Cette variation peut s'expliquer d'une part par la formation de courants ascendants, au milieu de la journée, qui accélèrent l'évacuation de la vapeur d'eau (ANGOT, 1928) et, d'autre part, par la diminution de production de vapeur d'eau due à la régulation stomatique (dépression de midi). Sur la figure 14 est également représentée la température de l'air qui est statistiquement peu différente de celle des feuilles. Le déficit de saturation croît plus que proportionnellement avec l'écart existant entre les deux courbes. Il est aisé de voir que, par journée de beau temps, il varie considérablement au cours de la journée.

Dans l'espace, ce déficit varie également en fonction notamment du degré d'aridité de la région : important en zone aride, ou même à l'échelle plus fine sur sol nu, il sera plus faible dans une zone forestière.

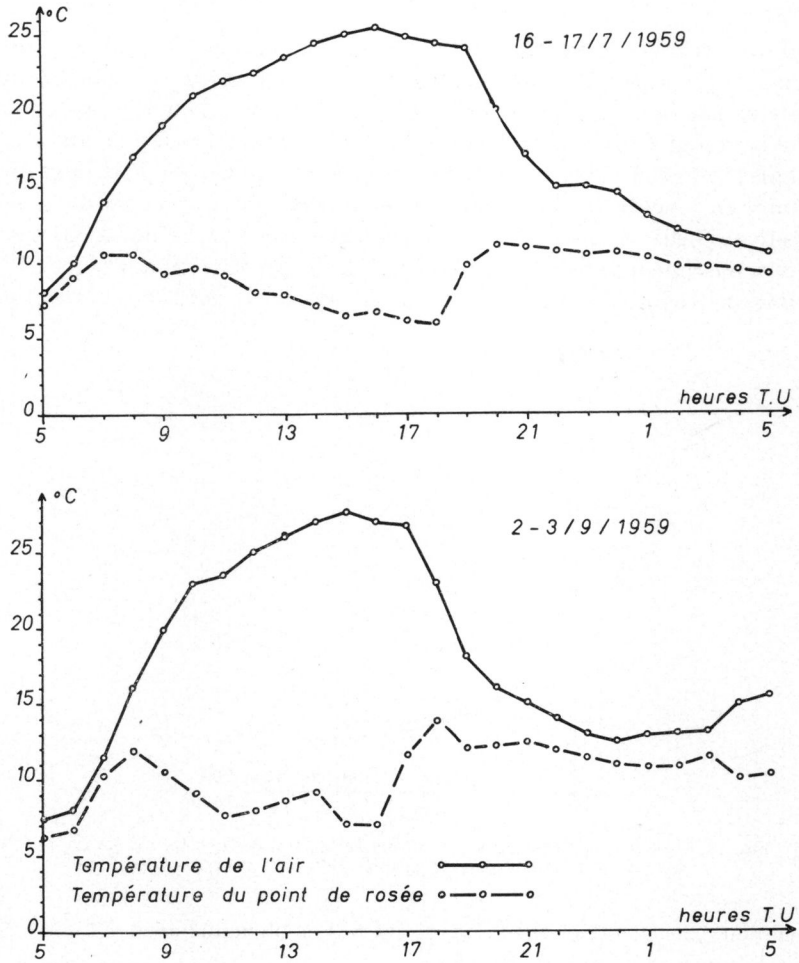


FIG. 14 — *Évolution des températures de l'air et du point de rosée pour deux journées de beau temps à Versailles* (orig.)

23. — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

La température commande en partie le déficit de saturation, mais elle intervient aussi par $F'(\theta)$. Ce terme n'a qu'une action relativement peu importante puisqu'il apparaît à la fois au numérateur et au dénominateur ; il n'aura même aucune action si le rapport $\frac{\Delta f \cdot u^{0,5} \cdot LD}{R_n \Gamma(l)}$ est égal à l'unité [1].

[1] Cf. BOUCHET 1963 pour la discussion des variations de ce rapport.

24. — Influence de la vitesse du vent

A grande échelle, le vent, facteur d'homogénéisation, agit sur le transfert de la chaleur et de la vapeur d'eau ; il contrôle par sa composante verticale, la diffusion turbulente et par sa composante horizontale, l'advection. L'importance de l'advection varie beaucoup selon l'hétérogénéité du couvert végétal (effet d'oasis). La diffusion turbulente dépend de la stabilité thermique de l'air, c'est-à-dire du gradient de température en fonction de l'altitude. Cette stabilité varie au cours de la journée.

A petite échelle, le vent modifie l'épaisseur de la couche limite laminaire ; il modifie par conséquent sa résistance à la diffusion des gaz. Milthorpe (1962), Powell (1940), Bange (1953) ont étudié les variations de cette résistance en fonction de la

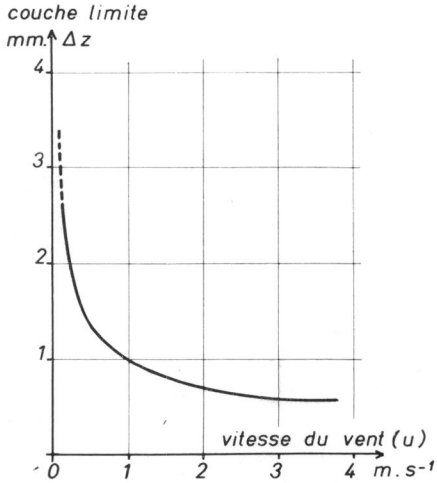


Fig. 15. — *Variation de l'épaisseur de la couche limite laminaire équivalente* Δz *en fonction de la vitesse du vent* (d'après Bouchet et Riou, 1960)

vitesse du vent ; Bouchet et Riou (1960) ont mis ce phénomène en évidence en trouvant la relation représentée figure 15.

L'épaisseur de la couche laminaire limite équivalente varie comme l'inverse de la racine carrée de la vitesse du vent.

L'évaporation est donc une fonction de cette dernière. L'importance du vent sera d'autant plus grande que le rayonnement net sera relativement plus faible (formule 1). Ce raisonnement est d'ailleurs valable pour le déficit de saturation.

Les variations de vitesse du vent dans le temps et l'espace sont importantes et relativement indépendantes du rayonnement, contrairement à ce qui a lieu pour la température et le déficit de saturation.

25. — Mesure de l'évaporation

Slatyer (1961) développe cette question avec beaucoup de détails et passe en revue les différentes méthodes. Nous y ajouterons les considérations suivantes. Le grand nombre et la diversité des méthodes de mesure de l'évaporation indiquent qu'il

n'en existe pas de parfaite ou tout au moins d'universelle. Le choix de la méthode de mesure dépend en effet de ce que l'on veut mesurer et plus particulièrement de l'échelle à laquelle sera effectuée la mesure : échelles du climat général, du climat défini par l'abri météorologique, du climat local, du climat ponctuel. Toutes les mesures d'ordre climatique sont soumises à cette difficulté ; c'est pourquoi les conditions doivent être définies et standardisées de façon à être reproductibles.

A l'échelle du climat général, le rayonnement étant le facteur d'action essentiel, la détermination de l'évaporation sera relativement simple. A l'échelle définie par l'abri météorologique, la détermination devra être faite à partir des mesures sous abri (Piche corrigé par exemple, voir BOUCHET 1963). A l'échelle du climat ponctuel, c'est-à-dire de la feuille, les mesures d'évaporation devront être faites directement dans les conditions les plus proches de celles dans lesquelles se trouve la feuille considérée de la plante choisie.

Alors qu'un calcul est possible à grande échelle à partir de quelques données simples, à petite échelle, il faut se contenter de mesures directes d'évaporation dont les conditions seront strictement standardisées ; les calculs très complexes dans ce cas ne correspondraient pas à la réalité.

La formule de BOUCHET ne constitue pas une nouvelle méthode de détermination de l'évaporation au niveau des feuilles, mais elle permet de prévoir le sens des phénomènes et l'importance relative des différents facteurs ; elle permet également de prévoir comment ces derniers peuvent être affectés par la technique de mesure.

Ainsi, l'évapotranspiration potentielle ponctuelle ou « demande » au niveau de la feuille présente des fluctuations importantes dans des intervalles de temps de quelques minutes ou sur des distances de quelques mètres ; il s'agit maintenant de savoir comment le végétal va réagir à ces variations.

Chapitre III

LA TRANSPIRATION

La transpiration traduit la réponse de la plante à la « demande » en eau exprimée par l'évaporation ou évapotranspiration potentielle ponctuelle. Elle ne diffère donc de cette dernière que par un terme ε_φ ; celui-ci exprime l'influence de la physiologie des organes végétaux sur la transpiration. Ce point de vue concerne tous les processus de la régulation stomatique et cuticulaire ; le coefficient ε_φ variera d'une valeur minimale représentant la part de la transpiration cuticulaire, variable d'une espèce à une autre, jusqu'à une valeur voisine de l'unité lorsqu'aucun phénoméne de régulation n'intervient.

L'action des différents facteurs du climat sur la transpiration peut être traduite par la formule (2) donnée précédemment (§ 13) :

$$\mathrm{ETR} = \mathrm{T} = \frac{\mathrm{R}_n + \dfrac{\Delta f \cdot u^{0,5}}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\Gamma(l)}}{1 + \dfrac{1}{\varepsilon_\varphi} \cdot \dfrac{1}{\mathrm{F}'(\theta)} \cdot \dfrac{\mathrm{K}\beta}{\mathrm{LD}}} \qquad (2)$$

A part ε_φ, tous les autres termes ont déjà été étudiés dans le chapitre précédent : ils agissent sur la transpiration comme sur l'évaporation. Il reste donc à voir l'aspect physiologique correspondant aux variations de ce coefficient, c'est-à-dire les transpirations cuticulaire et stomatique.

31. — La transpiration cuticulaire

La cuticule est une membrane poreuse et souple dont la dimension des pores et l'épaisseur sont différentes selon les plantes (tabl. 8). Les espèces adaptées à la sécheresse présentent souvent une couche cutinisée épaisse qui augmente leur résistance à la diffusion de l'eau et donc diminue leur transpiration cuticulaire. Grâce à la souplesse de cette membrane, toute baisse de turgescence des cellules épidermiques, correspondant à un début de dessèchement (« *incipient drying* », Livingston et Brown, 1912), provoquera une contraction de la cuticule aux dépens des canalicules qui la traversent : la résistance à la diffusion sera ainsi accrue. Même pour une espèce déterminée, la transpiration cuticulaire, soumise à cette régulation, n'est donc pas une fraction constante de l'évaporation ; lorsque cette dernière augmente, les pertes d'eau peuvent s'accroître, la turgescence tend à diminuer et de même la transpiration cuticulaire relative, c'est-à-dire rapportée à l'évaporation.

TABLEAU 8

Épaisseurs de la couche cutinisée et de la lamelle cellulosique des parois épidermiques des feuilles de quelques arbres
(d'après KAMP, 1930)

Espèces	Épaisseur en μ de la couche	
	Cutinisée	Cellulosique
Rhamnus glandulosus ...	2,6	6,5
Rhamnus alaternus.....	3,3	5,2
Acer syriacum	3,5	4,0
Quercus coccifera	8,0	0,8
Quercus ilex.....	9,5	0,9
Olea europaea.....	10,0	1,0
Nerium oleander	13,2	1,3
Olea lancea.....	13,5	1,2

En fait, la part cuticulaire de la transpiration est très difficile à mesurer ; pour l'apprécier correctement, il faudrait être certain de la fermeture complète des stomates, ce qui n'est pratiquement jamais le cas. On l'évalue parfois à partir de la transpiration de la face sans stomate d'une feuille quand celle-ci existe ; les feuilles de ce type présentant une structure anatomique dissymétrique, la méthode est donc discutable, d'autant plus que le bilan énergétique est très différent sur les deux faces : des gradients thermiques importants prennent ainsi naissance à l'intérieur de la feuille. Ces difficultés expliquent le petit nombre de résultats publiés sur ce sujet.

On peut tout de même citer les résultats de PISEK et BERGER (1938) (fig. 16). L'unité de mesure a malheureusement été mal choisie ; la comparaison des résultats

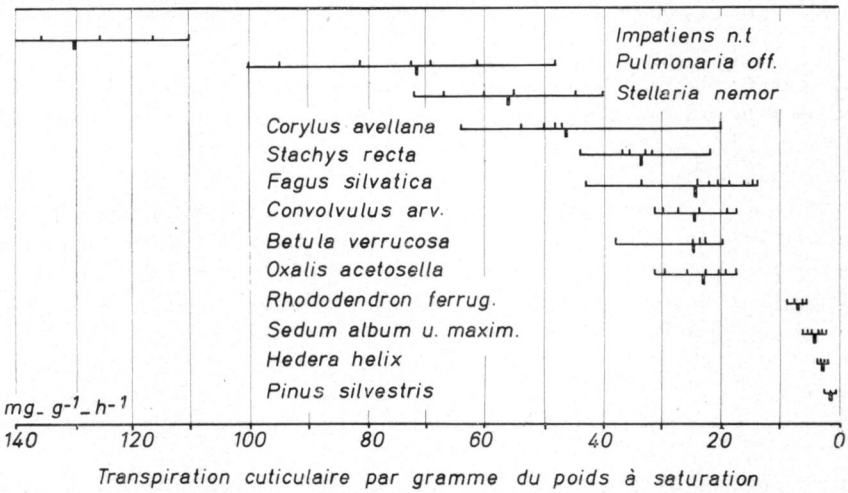


FIG. 16. — *Transpiration cuticulaire en milligrammes par gramme du poids à saturation et par heure pour une évaporation horaire de 300 mg (rondelle de papier buvard vert de 5 cm de diamètre). Le déficit en eau des feuilles était de 10 à 15 p. 100 du poids à saturation* (d'après PISEK et BERGER, 1938)

entre eux n'est possible qu'après correction par le rapport surface/poids frais des feuilles de chaque espèce considérée. En effet, pour être comparables, les mesures de transpiration doivent être exprimées en fonction de la surface. STÅLFELT (1932) trouve des valeurs pour le Bouleau de 3 à 4 p. 100 de l'évaporation mesurée dans les mêmes conditions. BANGE (1953) obtient des résultats analogues pour *Zebrina pendula*.

Les échanges d'eau à travers la cuticule semblent être assez faibles, mais ils sont relativement mal connus et pourtant leur importance est très grande. En effet, si la transpiration cuticulaire représentait 17 à 20 p. 100 de l'évaporation d'une surface équivalente totalement évaporante, il suffirait d'un indice foliaire de trois pour permettre à l'évapotranspiration réelle (ETR) d'une culture d'être égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP), même si les stomates étaient totalement fermés (fig. 17). Ces ordres de grandeur de transpiration cuticulaire et d'indice foliaire sont

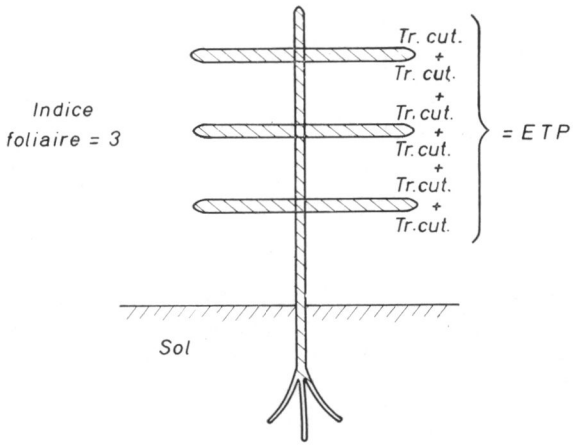


FIG. 17. — *Schéma montrant comment, grâce à un indice foliaire de 3 (= 6 faces foliaires), la transpiration cuticulaire seule peut fournir une quantité d'eau correspondant à ETP* (orig.)

valables pour beaucoup de plantes de grande culture. Ce phénomène très fréquent est d'une *extrême importance,* car selon les critères couramment admis, les cultures paraissent ne pas souffrir de la sécheresse puisqu'elle satisfont à la demande imposée par le climat (ETR = ETP) et pourtant, les stomates étant fermés, les conditions sont telles que la photosynthèse apparente est pratiquement nulle. Par ailleurs, malgré la fermeture des stomates, la compensation due à l'indice foliaire justifie la mesure de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir d'un couvert végétal abondant bien alimenté en eau, tout au moins si les valeurs instantanées de l'évaporation ne sont pas trop excessives.

32. — TRANSPIRATION STOMATIQUE

Le coefficient ε_φ de la formule (2) croît avec l'ouverture des stomates : STALFELT (1932) et BANGE (1953) ont pu mesurer les variations de la transpiration stomatique en fonction de cette ouverture (fig. 18). La transpiration varie d'abord très

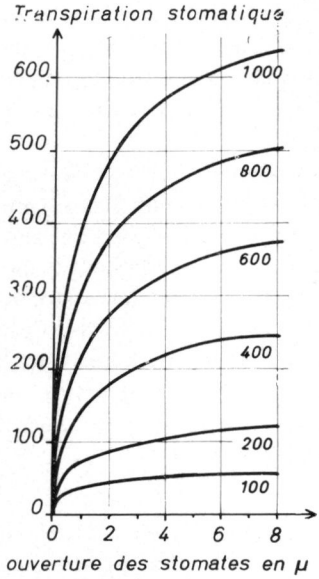


FIG. 18. — *Transpiration stomatique de feuilles de Bouleau en fonction de l'ouverture des stomates pour différentes valeurs de l'évaporation :* 100, 200, 400, 600, 800, et 1 000 *mg. h*$^{-1}$ *(rondelle évaporante verte de* 25 *cm*^{2}*) La transpiration est exprimée dans la même unité* (d'après STÅLFELT, 1932)

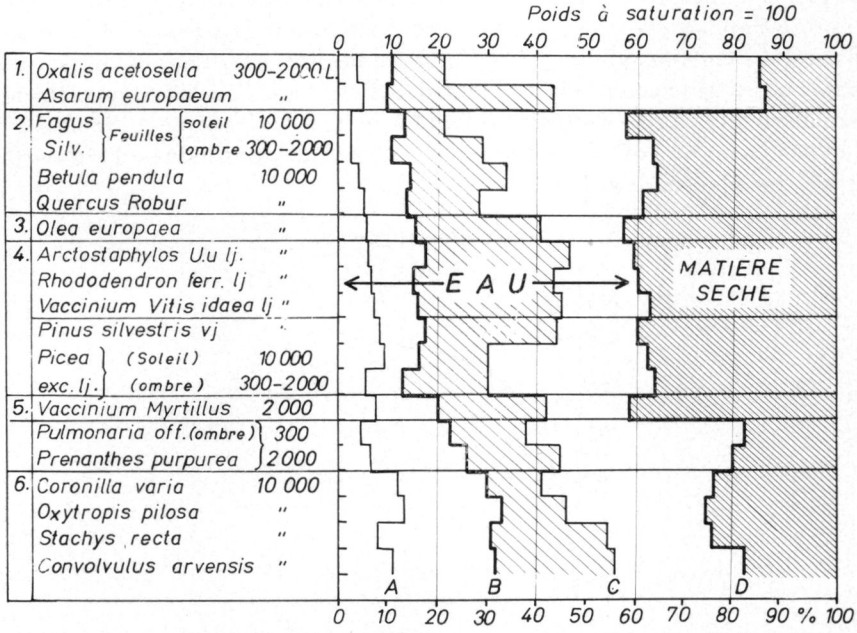


FIG. 19. — *Teneurs en matière sèche (courbe D) et en eau correspondant au début (A) et à la fin (B) de la fermeture des stomates et au déficit subléthal (C). La courbe C donne le déficit maximum en eau que peut supporter, par suite de la transpiration cuticulaire, une feuille sans subir de dommage apparent. Intensité lumineuse en Lux.*

1 — *Plantes d'ombre dense.* 2 — *Arbres à feuilles caduques.* 3 *et* 4 — *Arbres à feuilles persistantes.*
5 — *Plantes d'ombre moyenne.* 6 — *Plantes typiques de soleil.*

(d'après PISEK et WINKLER, 1953)

rapidement, puis plus lentement, ce qui fait bien ressortir l'influence prédominante de la résistance stomatique pour les faibles ouvertures et de la résistance dans la couche laminaire ensuite. Ce phénomène est accentué par temps calme (*u* faible) et pour des évaporations faibles ; la couche limite plus épaisse prend alors une importance relative plus grande.

Le degré d'ouverture des stomates dépend de l'état d'hydratation des cellules stomatiques (STÅLFELT 1955) ; celui-ci peut être estimé à partir de la pression de succion ou de la teneur en eau des feuilles que l'on peut traduire en pourcentage du poids à saturation (fig. 19). Lorsque leurs feuilles ont perdu 5 p. 100 de leur poids, la plupart des plantes commencent à fermer leurs stomates et à 15 p. 100 de perte, peu d'entre elles ont encore leurs stomates ouverts. Ces derniers sont donc très sensibles et tous les facteurs qui agissent sur l'état d'hydratation des cellules stomatiques modifient par là même leur degré d'ouverture. Selon que leur action est plus ou moins directe, il est courant de classer ces facteurs en deux groupes : les facteurs d'ordre hydrique et d'ordre photique.

321. — *Facteurs hydriques*

Les facteurs hydriques sont ceux qui agissent directement sur le potentiel de l'eau ou la pression de succion dans les tissus. Il y a d'une part, les facteurs concernant la « demande en eau » qui tend à accroître la pression de succion et donc à provoquer la fermeture des stomates, et d'autre part, les facteurs concernant l' « offre », c'est-à-dire l'apport d'eau aux tissus dont l'action sur la pression de succion est opposée. De l'état d'équilibre entre l'offre et la demande dépend l'ouverture des stomates ou, plus exactement, par l'introduction d'une résistance supplémentaire, la régulation stomatique s'établit de façon à réduire la demande à l'intérieur de la feuille au niveau de l'offre, c'est-à-dire finalement des possibilités d'absorption de l'eau par les plantes dans le sol.

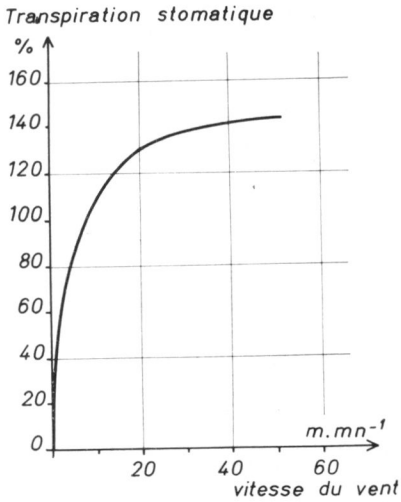


FIG. 20. — *Variation de la transpiration stomatique en fonction de la vitesse du vent* (d'après STÅLFELT, 1932)

La demande en eau correspond à l'évapotranspiration potentielle ponctuelle. Tous les facteurs agissant sur l'évaporation qui ont été étudiés dans le chapitre précédent se retrouvent donc ; notamment l'action du vent sur la transpiration stomatique en l'absence de régulation a été mise en évidence par STÅLFELT (1932) (fig. 20). La courbe présentée est en accord avec celle de la figure 15, elle répond par ailleurs à la loi en $u^{0,5}$ de la formule (2) : pour un vent nul, la couche limite est très importante, elle oppose par conséquent une très grande résistance à la diffusion, qui se traduit sur la figure 20 par une transpiration pratiquement nulle.

L'évapotranspiration potentielle ponctuelle varie au cours de la journée ; il s'ensuivra des variations de la teneur en eau des feuilles (fig. 1), donc de l'ouverture des stomates et de la transpiration.

Toutes les plantes ne réagissent pas de la même manière (fig. 21) ; certaines maintiennent dans leurs tissus une teneur en eau relativement constante, quelles que soient les conditions climatiques : elles sont du type « isohydrique » ou « stable » ; d'autres se flétrissent souvent d'une façon temporaire : elles sont du type « anisohydrique » ou « labile » ; tous les cas intermédiaires sont possibles. Les céréales sont du type « stable » tandis que la betterave à sucre est du type « labile ». Ce phéno-

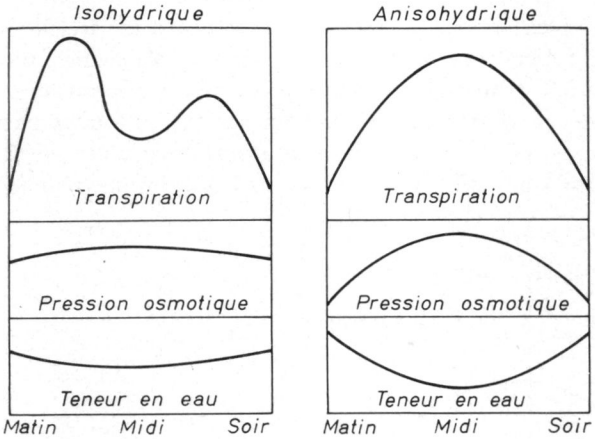


FIG. 21. — *Schéma de l'évolution journalière de l'eau dans les plantes de type isohydrique et anisohydrique* (d'après BERGER-LANDEFELDT, 1936)

mène semble être d'origine génétique (STOCKER 1956 *b*). Il existe en outre des variations importantes entre les variétés sensibles et résistantes à la sécheresse : l'assimilation n'est pas toujours parallèle à la transpiration (blé, avoine) (tabl. 9). Ce tableau permet de comprendre comment dans l'expérimentation agricole, le classement des variétés peut changer d'une zone climatique à l'autre : ainsi, pour l'avoine, l'efficience de l'eau (rapport assimilation/transpiration) peut varier du simple au double selon la résistance de la variété à la sécheresse sous un climat très sec ; sous un climat plus clément, les différences entre variétés pourront être négligeables.

L'offre ou disponibilité en eau dépend des possibilités d'absorption ; elle agit sur la teneur en eau, donc sur les stomates et la transpiration. Il y aurait lieu d'étu-

TABLEAU 9

Comparaison de la transpiration et de l'assimilation entre des variétés résistantes et sensibles à la sécheresse sous des conditions humides et sèches. Valeurs du quotient résistante/sensible × 100 (d'après STOCKER, 1947)

	Transpiration			Assimilation		
	Humide	Moyennement sec	Extrêmement sec	Humide	Moyennement sec	Extrêmement sec
Orge	75	64	—	85	103	189
Blé	130	95	—	77	95	152
Avoine	114	117	104	—	128	264
Betterave à sucre	85	96	140	85	119	137

dier ici l'action de l'humidité et du potentiel efficace de l'eau dans le sol sur l'alimentation en eau des plantes ; on se reportera à cet égard à l'article de M. HALLAIRE (1963). Nous en retiendrons seulement ici, qu'un sol, même au voisinage de la capacité de rétention, peut, si les conditions d'évapotranspiration potentielle ponctuelle sont intenses, présenter un potentiel efficace élevé : tout se passe alors comme si le sol était sec ; en effet, dans la microdiffusion de l'eau au voisinage des racines, celle-ci est soumise à une différence de potentiel qui, proportionnelle au débit, sera

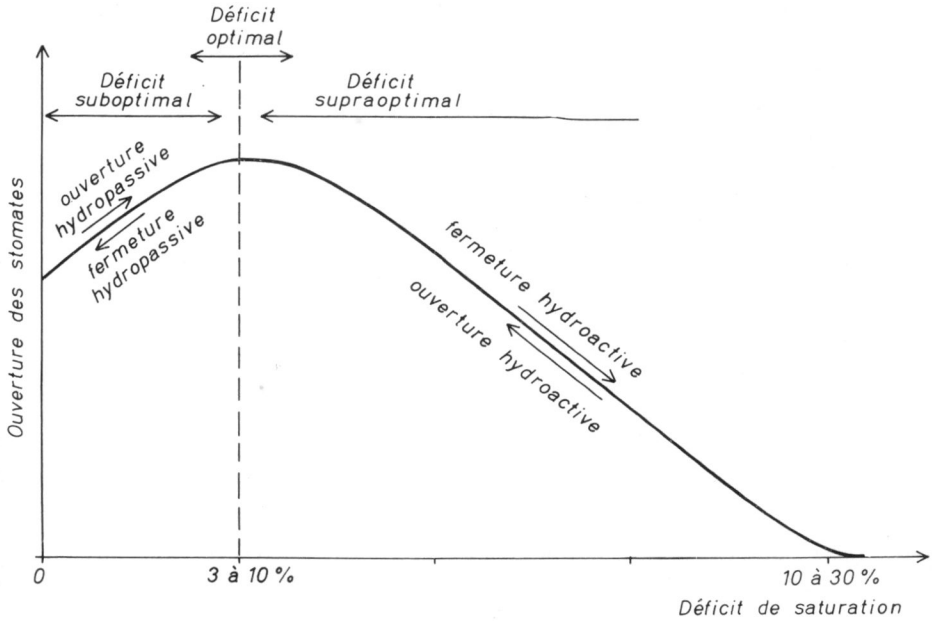


FIG. 22. — *Schéma des mouvements hydroactifs et hydropassifs des stomates en fonction du déficit en eau des feuilles (cf. fig. 19) pour une intensité lumineuse et une teneur en CO_2 données* (d'après LEMEE, 1956)

ainsi d'autant plus forte que l'évapotranspiration réelle est plus grande. En résumé, les végétaux réagissent de manière à maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande : il y a fermeture des stomates donc diminution de la transpiration lorsque l'offre est inférieure à la demande.

Les mouvements des stomates dus aux facteurs hydriques peuvent se schématiser de la façon suivante (fig. 22) : à pleine saturation, l'ouverture des stomates est limitée par la pression due à la turgescence des cellules épidermiques non stomatiques, les mouvements correspondants sont dits « hydropassifs » ; lorsque les mouvements stomatiques sont dus à une modification de la turgescence des cellules stomatiques elles-mêmes, ils sont « hydroactifs ».

322. — *Facteurs photiques*

Les facteurs photiques agissent indirectement sur le potentiel de l'eau dans les cellules stomatiques par l'intermédiaire de la pression osmotique. Il est actuellement admis que cette dernière est liée à l'acidité (pH) du milieu environnant, donc en particulier à la teneur en gaz carbonique au niveau des stomates. Toute diminution de la concentration de ce gaz provoque une augmentation du pH, favorable à la dissociation des sucres par phosphorolyse ; la pression osmotique augmente alors ; l'appel d'eau qui en résulte accroît la turgescence des cellules stomatiques et donc l'ouverture des stomates.

La teneur en gaz carbonique et la température sont généralement considérées comme des facteurs photiques, car ils agissent indirectement sur ce phénomène.

3221. — *Le rayonnement.*

Exposé à la lumière, le parenchyme chlorophyllien est le siège de réactions photosynthétiques qui abaisse l'acidité au niveau des stomates par suite d'une consommation de gaz carbonique. L'ouverture qui en résulte est dite « photoactive ». A l'obscurité, les phénomènes inverses se produisent. Lorsque le déficit en eau est voisin de sa valeur optimale, les variations d'ouverture des stomates sont parallèles à celles de l'intensité lumineuse (fig. 23) : c'est une des raisons pour lesquelles la transpiration stomatique dépend du rayonnement.

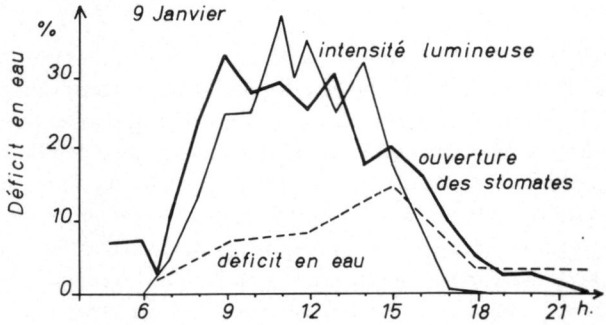


FIG. 23. — *Variations relatives de l'ouverture des stomates, de la lumière et du déficit en eau (en p. 100) d'une feuille de Citrus pendant l'hiver en Palestine* (d'après OPPENHEIMER et MENDEL, 1934)

3222. — *Le gaz carbonique.*

Par le mécanisme décrit plus haut, une augmentation de la teneur en gaz carbonique au niveau des stomates provoque leur fermeture (STÅLFELT 1959).

Ce phénomène revêt une grande importance car il est possible de concevoir qu'une augmentation judicieuse de concentration en gaz carbonique puisse, malgré une certaine fermeture des stomates et l'accroissement de la résistance à la diffusion des gaz qui en résulte, maintenir le taux de photosynthèse apparent pratiquement constant ; ce jeu de compensation n'existant pas pour la vapeur d'eau, la transpiration diminuera. Par une simple modification de la teneur en gaz carbonique, il semble donc possible d'améliorer l'efficience de la transpiration. Nous reviendrons plus loin à cette question.

3223. — *La température.*

Les basses températures constituent un facteur limitant de l'ouverture des stomates ; au-dessous de — 4°C, il semble qu'ils soient toujours fermés (WILSON 1948). Aux environs de 20°C, l'effet de la température est impossible à mettre en évidence car il est très difficile de le dissocier de son effet indirect sur le dessèchement des cellules, par l'intermédiaire, par exemple, du déficit de saturation de l'air Δf. Ces difficultés ont conduit les chercheurs à des conclusions souvent contradictoires (STÅLFELT 1956, p. 373) concernant cette influence plus ou moins indirecte de la température.

3224. — *Conséquences.*

L'action des différents facteurs est simultanée. Comme ils ne sont pas indépendants, il y a des phénomènes de compensation qui ne permettent pas toujours de savoir quel est le facteur limitant essentiel à un instant donné. WILSON (1948) a proposé une formule empirique pour essayer de rendre compte de ces interactions. En appelant t la température, l la lumière, Δf le déficit de saturation de l'air, l'ouverture Y des stomates en p. 100 de leur ouverture totale est donnée par :

$$Y = 0{,}067 . l(t + 4) - 0{,}002\ l.\Delta f.\ (t + 4)$$

Bien que les conditions expérimentales ne soient pas très satisfaisantes (mesures au poromètre sur la terrasse d'un laboratoire), le principe d'une telle formule est intéressant.

STÅLFELT (1929) a étudié l'évolution journalière de l'ouverture des stomates de *Picea excelsa* (fig. 24). Selon le déficit en eau des feuilles, il obtient quatre types principaux de courbes. La courbe A correspond à un jour de pluie avec température assez basse, tel qu'on en trouve en automne ; le déficit en eau de la feuille est suboptimal, l'ouverture hydropassive-photoactive ; la fermeture est passive ; la température est facteur limitant. La courbe B correspond à un jour de pluie, en été, avec une température relativement élevée ; les conditions sont alors très favorables à l'ouverture des stomates ; le déficit est suboptimal ou optimal, l'ouverture passive-photoactive, la fermeture passive. La courbe C correspond au type habituel en été ; le déficit d'abord suboptimal devient lentement supraoptimal ; l'ouverture est toujours passive-photoactive, la fermeture est hydroactive puis passive. La courbe

D correspond à une période de sécheresse estivale ; les conditions sont très défavorables à l'ouverture des stomates ; le déficit devient très rapidement supraoptimal, l'ouverture passive-photoactive est suivie d'une fermeture hydroactive complète

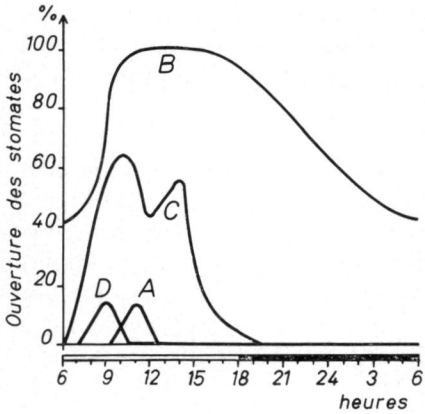


FIG. 24. — *Évolution journalière de l'ouverture des stomates de* Picea excelsa.
A, par temps pluvieux en automne — B, par temps pluvieux en été — C, type habituel en été — D, période sèche en été (d'après STÅLFELT, 1929).

323. — *Mesure des stomates*

Il y a quatre types principaux de méthodes de mesure de l'ouverture des stomates dont nous allons rapidement passer en revue les principes : les méthodes porométrique, par infiltration, par film de surface et microscopique.

La méthode porométrique consiste à mesurer la vitesse d'écoulement d'un flux d'air visqueux à travers une feuille (HEATH 1959, ECKHARDT 1960). Cette technique délicate à mettre en œuvre par suite des nombreuses corrections nécessaires, perturbe complètement le milieu naturel (couche limite, température, rayonnement, déficit de saturation, teneur en CO_2). Très employé au laboratoire, car les mesures sont susceptibles d'être enregistrées, elle ne peut en aucune manière constituer une méthode valable dans les conditions naturelles.

La méthode par infiltration consiste à étaler sur la surface de la feuille à tester des gouttes de liquides de viscosité et de tension superficielle différentes, qui, si elles pénètrent, provoquent la formation d'une tâche sombre sous l'épiderme. Un mélange d'isobutanol et d'éthylène glycol dont on fait varier les proportions peut convenir. Après étalonnage, cette technique donne des ordres de grandeur relatifs intéressants. Elle présente le gros avantage d'être rapide et très simple à mettre en œuvre.

La méthode par film de surface consiste à déposer sur la feuille un film de collodion, d'acétate de cellulose ou d'une autre matière plastique polymérisable. Après séchage ou polymérisation, on enlève la pellicule formée et on l'examine au microscope : un simple ruban adhésif peut parfois convenir. Bien qu'elle ait été employée avec succès par certains chercheurs (SHMUELI 1954, NORTH 1956), cette technique donne souvent de mauvais résultats, spécialement quand les stomates sont petits ou quand les feuilles sont pubescentes.

La méthode microscopique, qui est la méthode de référence, donne de bons résultats à condition d'opérer sur plante intacte avec un éclairage par incidence (système Ultropak par exemple). Malheureusement, le champ microscopique est limité et la mesure est relativement ponctuelle, même si elle est répétée plusieurs fois ; par ailleurs, les ouvertures inférieures au micron sont difficiles à déceler et ce sont pourtant les plus intéressantes à bien connaître, puisque c'est pour de telles ouvertures que la résistance stomatique à la diffusion devient prépondérante (voir ci-dessus, § 1222).

324. — *Stomates et transpiration*

Nous avons vu comment la transpiration varie avec l'ouverture des stomates (fig. 17). La transpiration cuticulaire s'ajoute à la transpiration stomatique pour former la transpiration totale (fig. 25). Une double question vient à l'esprit au terme

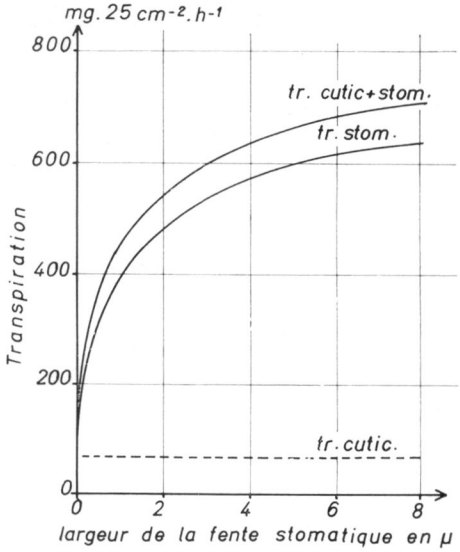


FIG. 25. — *Relation entre la transpiration stomatique et totale et l'ouverture des stomates pour une évaporation de* 1 000 *mg par heure et pour* 25 *cm²*.
Tr. stom. = *Transpiration stomatique de la face inférieure de la feuille.*
Tr. cutic. + stom. = *Transpiration stomatique de la face inférieure + cuticulaire des faces inférieure et supérieure.*
Tr. cutic. = *Transpiration cuticulaire des faces inférieure et supérieure. Feuilles de Bouleau hypostosmatiques* (d'après STÅLFELT, 1932).

de cette étude : quelle est l'importance relative des stomates et de leur dimension ?

Lorsque les stomates sont bien ouverts, de faibles variations d'ouverture n'ont pratiquement aucun effet sur la transpiration (fig. 18 et 25). Les variations de résistance qui en résultent sont en effet infimes. Par contre, pour des ouvertures de l'ordre du micron, la résistance à la diffusion varie très vite pour de faibles changements ; la régulation stomatique devient alors très efficace.

Il découle de ce qui précède que de nombreux petits stomates permettront une régulation beaucoup plus efficace de la transpiration que de grands stomates moins

nombreux ; ce caractère fait d'ailleurs partie des xéromorphoses. D'un point de vue génétique, il serait intéressant d'étudier ce phénomène en liaison avec la résistance à la sécheresse : on sait déjà que les polyploïdes présentent généralement de grands stomates. Ce caractère peut dans une certaine mesure être modifié par les conditions de milieu : en effet, les feuilles d'une plante se développant au printemps ont souvent des stomates plus grands et moins nombreux que celles qui se développent en été sous des conditions climatiques plus difficiles. Il semble d'ailleurs que pour une variété donnée, le nombre de stomates pour 100 cellules épidermiques soit plus ou moins génétiquement fixé ; l'adaptation à la sécheresse consiste en une diminution de la taille de l'ensemble des cellules des tissus foliaires (fig. 10), sauf en présence d'ion chlore (Cl^-) dans la solution du sol ; c'est probablement une des raisons pour lesquelles les plantes résistent mal à la sécheresse en présence de chlorure de sodium. L'ion sulfate (SO_4) plus favorable, agit dans le sens contraire (STROGONOV 1958 et 1960).

33. — MÉTHODES DE MESURE DE LA TRANSPIRATION

Les différentes composantes de la transpiration étant analysées, il convient maintenant d'étudier les résultats des mesures : il existe plusieurs méthodes et, comme pour les stomates, elles ne présentent pas toutes le même intérêt écologique ; c'est d'après ce critère que nous nous efforcerons de les classer en en faisant un examen critique sommaire.

331. — *Classification écologique et examen critique des méthodes*

Il découle des notions précédemment définies qu'une méthode de mesure de la transpiration, pour être valable dans les conditions naturelles, ne doit perturber ni la couche limite équivalente, ni l'ouverture des stomates puisque l'essentiel de la résistance à la diffusion a lieu dans cette couche limite équivalente et dans les stomates.

Il existe deux grands types de méthodes de mesures de la transpiration : les méthodes de mesure globales et les méthodes ponctuelles.

Les méthodes de mesure globales portent sur quelques mètres carrés de culture ou plus. A condition d'éliminer les effets d'oasis tels qu'ils ont été définis par différents auteurs et notamment par BOUCHET (1962), ces méthodes permettent de respecter les conditions ci-dessus. Elles reposent sur deux principes différents : le bilan d'eau dans des bacs de culture (évapotranspiromètres, lysimètres...) et le calcul du flux de vapeur au-dessus d'une culture à partir de mesures de gradient de vapeur d'eau (méthodes aérologiques ou aérodynamiques).

Ces dernières méthodes sont théoriquement les meilleures puisqu'elles n'entraînent que des perturbations minimes dans la culture et le milieu environnant ; elles permettent la mesure aussi bien des condensations que des évaporations réelles. Malheureusement, les calculs sont compliqués du fait des mouvements latéraux des masses d'air.

Les autres méthodes de mesure sont ponctuelles, c'est-à-dire qu'elles portent sur un organe végétal dont la surface est généralement limitée à quelques centimètres carrés. Dans ce cas, bien qu'elle soit généralement instantanée, la mesure

perturbe alors nécessairement, soit le milieu extérieur, c'est-à-dire la couche limite équivalente, soit l'organe végétal.

Parmi les méthodes où les mesures perturbent le milieu extérieur on peut ranger les méthodes par contact (papier au chlorure de cobalt, méthode hygrophotographique...) qui conviendraient plutôt à des mesures relatives de l'ouverture des stomates par suite de la suppression d'une bonne partie de la couche limite et les méthodes nécessitant l'utilisation d'une enceinte (cloche, poromètre...). Pour les mesures de transpiration sur le terrain, ces méthodes sont à proscrire car elles entraînent des modifications pratiquement inconnues de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau au niveau de la feuille, c'est-à-dire des modifications de l'épaisseur de la couche limite équivalente ; elles ont également une influence très importante sur le bilan énergétique (« effet de serre ») : on peut ainsi calculer que pour rétablir, dans une cloche ou une coupe porométrique, des conditions de rayonnement comparables à celles du milieu naturel, c'est-à-dire pour annuler l'« effet de serre », il faudrait maintenir les parois de ces enceintes à une température inférieure de 40°C à l'ambiance ; mais les problèmes liés à l'hygrométrie seraient alors insolubles à moins de trouver une paroi totalement transparente aux rayonnements de toutes les longueurs d'onde. La température, qui est le facteur le plus facile à contrôler, présente des variations considérables (tabl. 10). GAASTRA (1959) donne des résultats analogues avec des éclairages artificiels. L'assimilation est profondément affectée (fig. 26).

TABLEAU 10

Températures de feuilles par journées claires d'été.
Valeurs moyennes, extrêmes et nombre de mesures entre parenthèses
(d'après PISEK, 1960)

		Heures	Intensité lumineuse	Feuilles dans une enceinte d'aspiration au bout de 2 à 4 minutes		Feuilles dans l'air	Température de l'air (Assmann)
				Non ombragé	Ombragé		
Hêtre 18-7-52	Soleil	10	65 000 lux	*37,7°C* 35,2-39,3 (6)	*29,5°C* 25,7-32,8 (6)	*26,9°C* 24,7-28,4 (6)	18-19°
	Soleil	12	70 000 lux	*42,2°* 38,5-44,4 (18)	*33,6°* 31,7-36,0 (11)	*30,8°* 29,1-32,5 (7)	24°
	Ombre	14,30	1 400 lux	*22,4°* 21,9-23,0 (13)		*21,9°* 21,7-22,2 (8)	—
Sapin	Soleil	11	70 000 à 80 000 lux	*35,4°* 33,5-36,9 (18)	*32,0°* 31,2-33,1 (8)	*28,4°* 26,8-30,8 (13)	—
	Soleil	13	65 000 à 70 000 lux	*38,5°* 36,1-41,0 (19)	*35,4°* 33,7-36,8 (13)	*33,3°* 30,4-36,7 (15)	—
	Ombre	16,30	4 000 lux	*27,7°* 27,1-28,2 (12)		*25,9°* 25,0-26,3 (6)	—

La mesure de la transpiration par ces méthodes perd toute signification écologique. Il n'en reste pas moins qu'elles présentent un intérêt dans les recherches physiologiques et certaines de ces méthodes peuvent donner des indications intéressantes quant à la conductance stomatique.

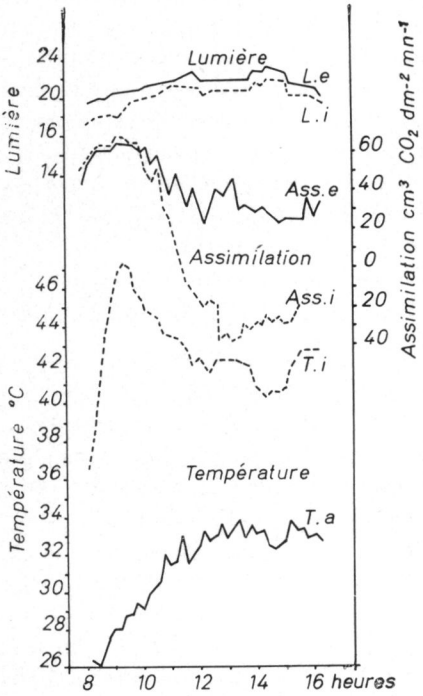


FIG. 26. — *Évolution journalière de l'assimilation du gaz carbonique avec (Ass.* e*) et sans (Ass. i) refroidissement de la coupe porométrique. Ti, température de l'air extérieur, Ta, à l'intérieur de la coupe non refroidie ; L. e, lumière à l'extérieur ; L. i, lumière à l'intérieur.* (d'après BOSIAN et ENSGRABER, 1955)

Les autres méthodes (potomètre, rameau coupé) où la mesure affecte l'organe vivant peuvent donner des résultats valables à condition de prendre un certain nombre de précautions indispensables : d'une part, il faut respecter les conditions du milieu extérieur, ce qui est possible à réaliser d'une façon à peu près satisfaisante sur le terrain ; d'autre part, la résistance stomatique étant la plus importante des résistances au niveau du végétal, il faut s'assurer qu'aucune variation de l'ouverture stomatique n'intervient au cours du prélèvement et de la mesure ; ces méthodes ne sont donc pas utilisables sur tous les végétaux.

Les valeurs de la transpiration obtenues ne seront que des valeurs relatives, donc difficiles, sinon impossibles, à comparer et à interpréter. Or, lorsque les stomates sont ouverts, la surface foliaire est très comparable à une surface totalement évaporante. C'est pourquoi il est logique de rapporter les mesures de transpiration faites dans les conditions naturelles à des mesures de l'évaporation physique faites strictement dans les mêmes conditions et en même temps. Alors que les valeurs absolues de ces mesures aussi bien de transpiration que d'évaporation sont, au point de vue écologique, pratiquement inutilisables (en particulier, on ne peut en aucun

cas prétendre que ces mesures ponctuelles et instantanées constituent des mesures valables de l'évapotranspiration potentielle à plus grande échelle, BOUCHET 1963), leurs comparaisons présentent un double intérêt. D'une part, les écarts constatés entre les valeurs simultanées de la transpiration et de l'évaporation permettent d'apprécier l'importance des phénomènes de régulation stomatique ; ils constituent même par l'intermédiaire de ε_φ (cf. § 424) une mesure indirecte de cette régulation. D'autre part, les valeurs de la transpiration rapportées à celles de l'évapotranspiration potentielle ponctuelle, que nous étudierons dans le chapitre suivant, deviennent comparables dans le temps et l'espace ; il est alors possible d'interpréter les résultats, mais il faut que l'évapotranspiration potentielle ponctuelle soit mesurée strictement dans les mêmes conditions de milieu que la transpiration ; cette dernière condition est difficilement réalisable avec le potomètre qui, par ailleurs, n'est pas d'un emploi très commode sur le terrain.

332. — *Description d'une méthode écologique utilisable*

La méthode de mesure de la transpiration qui permet à peu près de satisfaire aux conditions précédentes semble être celle dont le principe dérive de la méthode dite du « rameau coupé » : la transpiration d'une feuille ou d'une partie de feuille est comparée à l'évaporation d'une surface évaporante standard placée strictement dans les mêmes conditions. La surface évaporante utilisée est une pastille Piche de trois centimètres de diamètre. Une rondelle de feuille de même diamètre est découpée à l'emporte-pièce chaque fois que les dimensions du végétal le permettent. Une balance de torsion sensible au milligramme et pratiquement insensible à la température et au vent permet d'obtenir simultanément la transpiration et l'évaporation. Pour diminuer au maximum les perturbations du milieu extérieur, la balance est placée dans la culture elle-même, à proximité immédiate des feuilles sur lesquelles se feront les mesures. Chaque pesée dure une dizaine de secondes. Entre les pesées, l'échantillon de feuille est suspendu verticalement à un petit support placé dans la culture de façon qu'il soit dans une position comparable à celle des feuilles environnantes. La surface évaporante de référence est suspendue au même support dans les mêmes conditions ; les pesées sont faites de façon que la mesure d'évaporation encadre la mesure de transpiration. La transpiration est déduite de plusieurs pesées faites à intervalles réguliers.

Pour que la méthode soit utilisable, il faut s'assurer pour chaque espèce végétale différente que la coupure ne provoque pas de variations sensibles de l'ouverture stomatique dans les quelques minutes qui suivent. Ces variations sont faciles à contrôler grâce à l'emploi d'un microscope équipé d'un éclairage en lumière incidente (système Ultropak, grossissement $\times$ 500). Elles sont d'ailleurs rares pour des plantes de culture courante sous le climat de la région parisienne. On a tout de même constaté pour un certain nombre d'espèces une augmentation importante de la transpiration après la coupure, spécialement en cas de déficit important (LEMÉE, communication personnelle) ; cette eau serait libérée par la disparition des tensions dans les colonnes capillaires du bois.

La constance de la perte de poids entre chaque pesée durant les quelques minutes de la mesure est une garantie complémentaire de la valeur de la méthode pour le végétal utilisé.

Lorsqu'une feuille est découpée à l'emporte-pièce, une certaine surface est mise à nu : pour une rondelle de trois centimètres de diamètre prélevée dans une feuille d'un dixième de millimètre d'épaisseur, cette surface représente 0,7 p. 100 de la surface totale de la rondelle. Il était logique de penser que le bord de la rondelle jouait un rôle privilégié dans l'évaporation à cause principalement de la forme des couches limites dans cette zone. C'est pourquoi des mesures comparatives ont été faites avec des pastilles évaporantes de 0,2 mm et 1,4 mm d'épaisseur ; la différence de surface correspondante est d'environ 10 p. 100 : nous n'avons pas observé de différence d'évaporation supérieure à cette différence de surface et pour un vent atteignant quatre mètres par seconde. Dans la plupart des cas, il semble donc que l'on puisse considérer cette erreur, dont le sens est d'ailleurs connu, comme négligeable. Si les feuilles sont épaisses, elle ne le sera plus, mais il est alors possible de l'apprécier et de corriger la mesure en conséquence.

L'avantage de cette méthode réside dans la rapidité et la simplicité des mesures ; il est ainsi facile d'accumuler un grand nombre de mesures dont l'ensemble permet des interprétations fructueuses.

34. — Résultats

Parmi tous les résultats publiés et obtenus par diverses méthodes, nous avons choisi quelques exemples présentant un intérêt écologique certain et répondant le mieux possible aux conditions expérimentales idéales de mesure définies ci-dessus.

Un aspect spécialement intéressant concerne les fluctuations journalières de la transpiration. Beaucoup de travaux de ce genre ont été entrepris sous des conditions climatiques extrêmes. Lorsque les conditions sont favorables (humidités de l'air et du sol suffisantes), la transpiration évolue parallèlement à l'évaporation (fig. 27).

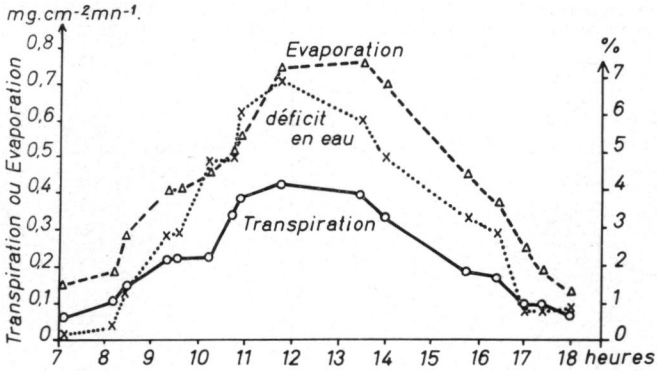


Fig. 27. — *Variation journalière de l'évaporation, de la transpiration et du déficit en eau d'une feuille de Banane à São Paulo, dans une culture bien alimentée en eau* (d'après Morello, 1953)

Si la sécheresse de l'air est trop grande et l'humidité du sol insuffisante (fig. 28) la dépression de la transpiration au milieu de la journée est beaucoup plus nette. Tous les cas intermédiaires peuvent exister quelle que soit la zone climatique (fig. 29

et 30) ; les figures 31 *a* et *b* montrent l'importance du développement du système radiculaire sur les phénomènes de transpiration.

Toutes ces courbes peuvent être classées en quelques types que STOCKER (1956) a bien définis (fig. 32). La courbe 1 devrait être plus proche de celle de l'évaporation, car, dans ce cas, l'énergie est seul facteur limitant. Ce schéma peut être consi-

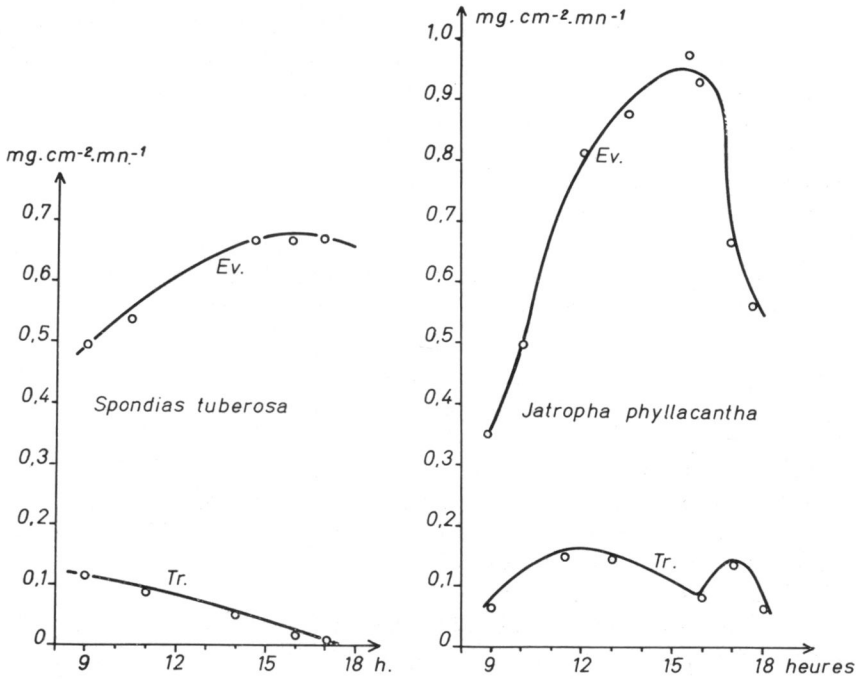


FIG. 28. — *Evolution journalière de l'évaporation et de la transpiration de plantes du Caatinga brésilien au commencement de la période sèche (début avril)* (d'après FERRI et LABOURIAU, 1952)

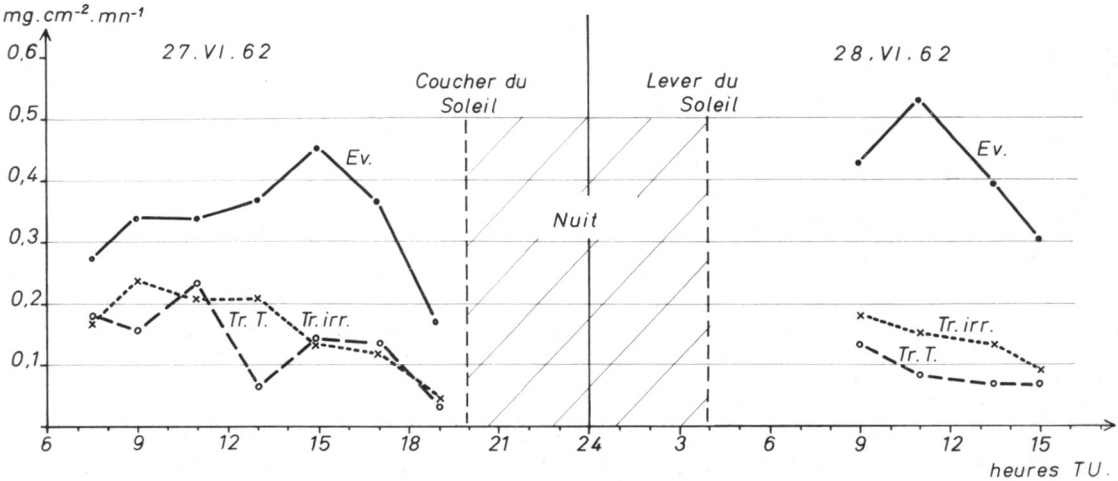


FIG. 29. — *Évolution journalière de l'évaporation (pastille Piche blanche) et de la transpiration du blé à Versailles* (orig.)

déré de deux façons différentes selon le facteur limitant prépondérant : d'une part, si les conditions climatiques sont favorables, c'est-à-dire dans le cas d'une évapotranspiration potentielle ponctuelle faible, les courbes de transpiration évolueront du type 1 jusqu'au type 7 selon les disponibilités en eau du sol qui constitueront alors

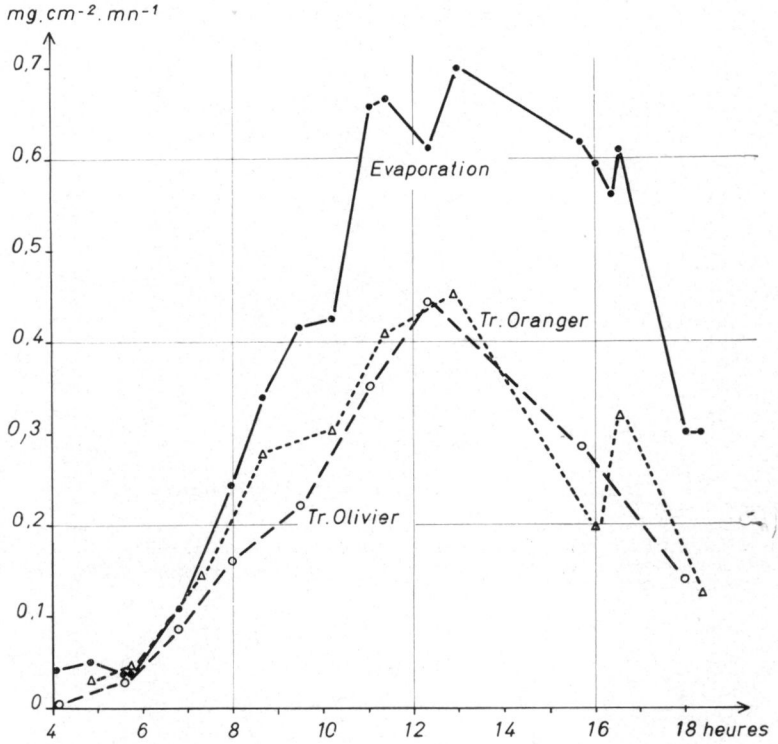


FIG. 30. — *Évolution journalière de l'évaporation et de la transpiration de l'olivier et de l'oranger à Tunis* (orig.)

le facteur limitant essentiel (cf. HALLAIRE, 1963) ; d'autre part, les conditions édaphiques étant optimales, les courbes évolueront de la même manière lorsque l'évapotranspiration potentielle ponctuelle passera de valeurs faibles à des valeurs importantes. Ce dernier phénomène est très fréquent en été, même en zone tempérée.

L'interprétation des mesures de transpiration exige donc la connaissance des conditions climatiques et édaphiques qui ont présidé à l'expérience. Toutefois, dans le cas où on se bornerait par exemple, à étudier des comparaisons interspécifiques, il pourrait à la rigueur être suffisant d'opérer de façon que ces conditions soient constantes grâce notamment à des mesures simultanées.

Il est courant de rapporter les mesures de transpiration au poids frais, souvent plus facile à obtenir que la surface de l'organe transpirant. Les résultats obtenus sont alors beaucoup moins riches d'information et leur interprétation risque de conduire à des erreurs. Cette technique est, à la rigueur valable si elle s'applique à une même espèce et dans la mesure où l'on connaît au moins approximativement

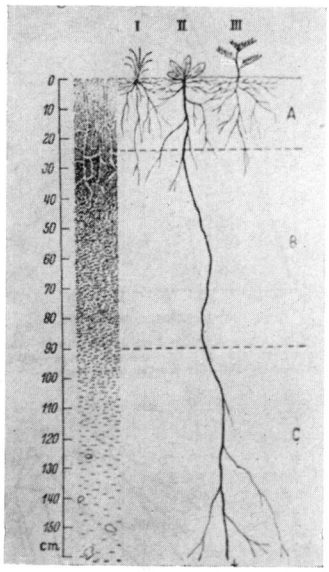


FIG. 31 *a*. — *Profil de sol de la steppe alcaline hongroise.*
A, *horizon lessivé crevassé par la sécheresse*
B, *couche d'accumulation fortement durcie*
C, *sous-sol* (*limon humide*). *Plan d'eau à environ* 4,5 *mètres de profondeur.*
I = Festuca pseudovina ; II = Statice gmelini ; III = Artemisia monogyna (d'après STOCKER, 1933, dans STOCKER, 1956).

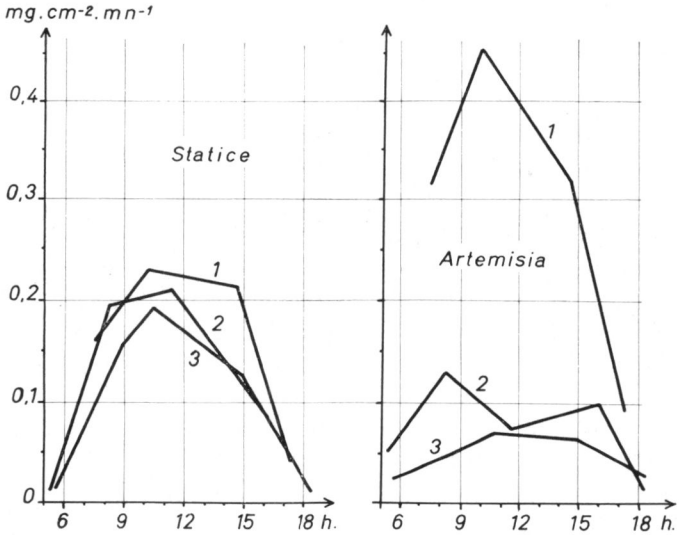


FIG. 31 *b*. — *Évolution journalière de la transpiration de deux espèces de la steppe alcaline hongroise pour la même évaporation.* Artemisia monogyna, *plante à racines superficielles,* Statice gmelini, *à racines profondes.* 1, *bonne humidité du sol jusqu'en surface.* 2, *sécheresse moyenne des couches superficielles.* 3, *desséchement important des couches superficielles* (d'après STOCKER, 1933, dans STOCKER, 1956)

la relation poids frais/surface. Cette dernière n'est d'ailleurs pas constante puisqu'elle dépend du taux d'hydratation de la feuille.

L'étude de la transpiration végétale peut être envisagée sous de multiples aspects ; nous venons de voir que ses variations journalières sont étroitement liées à celles de l'évaporation comme pouvait d'ailleurs le laisser prévoir la comparaison des formules (1) et (2). Étant donné ce rôle primordial joué par les facteurs climatiques sur la transpiration, il nous a paru essentiel de consacrer un chapitre entier à l'étude de la relation entre la transpiration et l'évaporation.

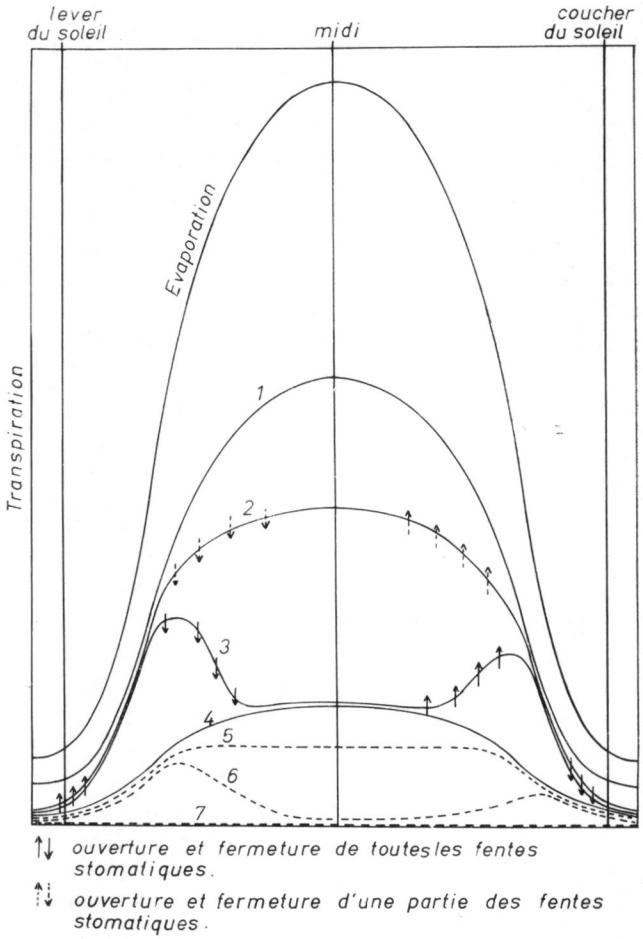


FIG. 32. — *Schéma des différentes évolutions possibles de la transpiration selon les conditions d'équilibre ou non de l'alimentation en eau.*

1. *Stomates constamment ouverts ; la transpiration suit l'évaporation.*
2. *Dépression de midi due à une fermeture partielle des stomates. Stomates fermés la nuit.*
3. *Fermeture complète des stomates au milieu de la journée.*
4. *Fermeture complète. Transpiration cuticulaire proportionnelle à l'évaporation.*
5. *Accroissement de la résistance cuticulaire au milieu de la journée.*
6. *Résistance cuticulaire très forte au milieu de la journée.*
7. *Mauvaise alimentation en eau. Transpiration presque nulle. Résistance cuticulaire constamment forte* (d'après STOCKER, 1956).

Chapitre IV

RELATION ENTRE LA TRANSPIRATION ET L'ÉVAPORATION

Dans les conditions naturelles, les mesures de transpiration ne sont pas faciles à interpréter. Les végétaux sont soumis, même dans les climats les plus réguliers, à des variations continuelles du milieu ambiant auxquelles ils réagissent plus ou moins passivement. Ces multiples fluctuations sont fort gênantes pour exprimer les résultats des mesures d'une façon cohérente. Comme le suggèrent les formules (1) et (2), les facteurs climatiques agissent de la même manière sur la transpiration et l'évaporation ; il semble donc logique d'étudier comment varie la transpiration en fonction de l'évaporation.

41. — Transpiration ou débit maximal

Stålfelt (1932), dans une étude très détaillée, présente des résultats concernant les variations de cette relation avec l'ouverture des stomates (fig. 33) pour des feuilles de Bouleau. Comme on pouvait s'y attendre, la transpiration est d'autant plus voisine de l'évaporation que les stomates sont plus ouverts. La figure 34 donne le détail des mesures que nous avons effectuées sur maïs dans la région parisienne sous des conditions climatiques très diverses. Cette diversité des conditions climatiques et le fait que ces mesures n'intègrent pas le « passé écologique » de la plante expliquent la dispersion relative des points ; malgré cela, il ressort très nettement de cette figure une diminution relative de la transpiration lorsque l'évapotranspiration potentielle ponctuelle augmente : les stomates se ferment et réduisent la transpiration comme le montre la figure 33. Ce phénomène dénote l'existence d'une sorte de plafond correspondant à un débit maximal d'eau à travers le végétal. Ce débit, qui dépend du sol, de l'enracinement et du climat, est relativement faible : un calcul approché, effectué à partir de mesures ponctuelles et instantanées, en tenant compte de l'indice foliaire et du temps, montre qu'il correspond à des évapotranspirations potentielles de l'ordre de deux à trois millimètres par jour. Ce résultat se recoupe avec celui indiqué par M. Hallaire (1961) en partant de ses travaux sur la dynamique de l'eau dans le sol.

Il est remarquable de constater la faible influence de l'irrigation sur ce débit maximal ; tant que l'humidité du sol (limon profond) se trouve au-dessus du point de flétrissement permanent et que l'évapotranspiration potentielle dépasse un certain niveau minimal (mal connu mais certainement très faible), tout se passe comme

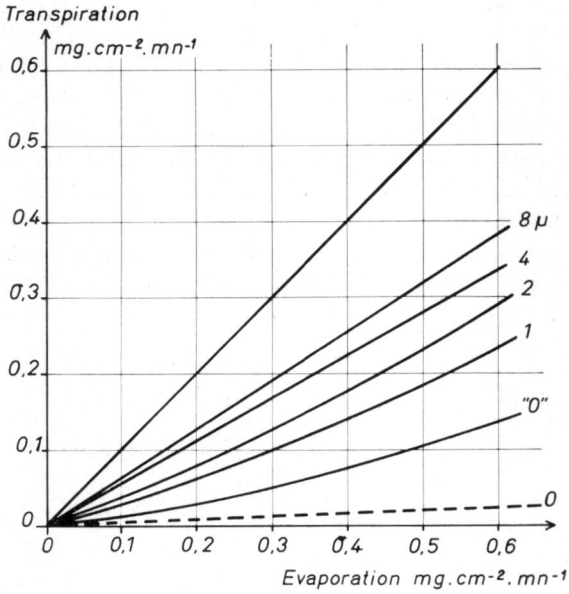


FIG. 33. — *Relation entre la transpiration et l'évaporation pour différentes ouvertures stomatiques* (1, 2, 4, et 8 µ). *« O » correspond à la fermeture optique, telle qu'elle peut être constatée au microscope. La courbe en pointillé O correspond à la transpiration cuticulaire de la face supérieure de la feuille de Bouleau. L'évaporation était mesurée à partir d'une rondelle de papier buvard vert* (adapté d'après STÅLFELT, 1932)

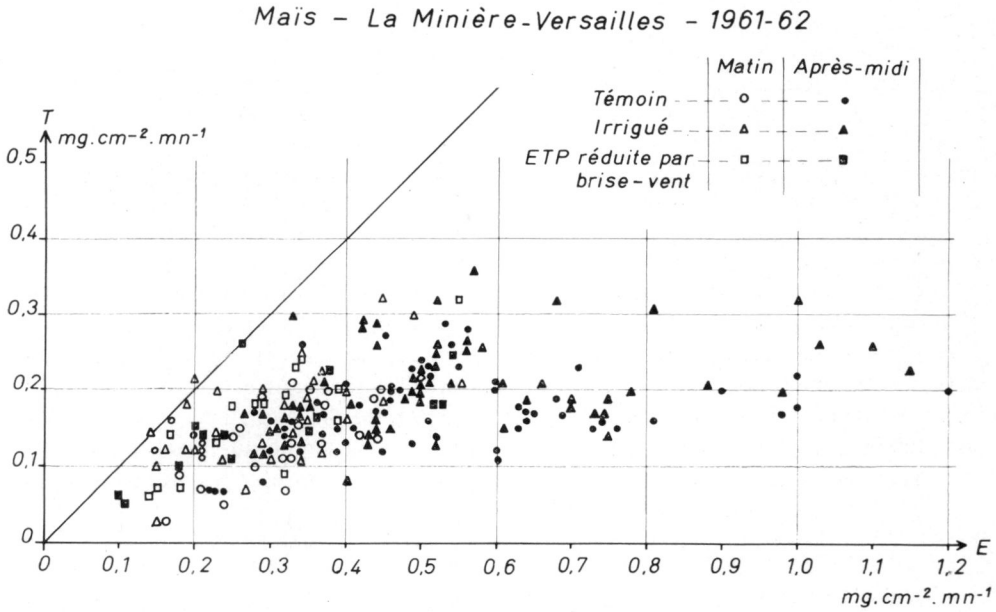


FIG. 34. — *Relation entre la transpiration et l'évaporation pour le Maïs dans la région parisienne en* 1961 *et* 1962 *en culture irriguée, avec ou sans brise-vent, et en culture témoin. Les mesures étaient faites le matin entre* 8 *et* 9 *h. TU et l'après-midi entre* 13 *et* 14 *h TU. L'évaporation était mesurée à partir d'une pastille Piche blanche de* 3 *cm de diamètre* (orig.)

si la différence de potentiel efficace (cf. HALLAIRE 1963) de l'eau entre le sol et les feuilles était la même quelle que soit la teneur en eau du sol : le débit doit alors être principalement déterminé par la nature du sol et surtout par l'importance de l'enracinement de la culture. Mais les végétaux réagissent tout de même à la sécheresse du sol en diminuant leur indice foliaire : nous avons ainsi constaté que, pour des betteraves irriguées à partir du 4 août 1961, l'indice foliaire était au 20 septembre 1961, trois fois plus grand que celui des témoins ; la différence était due à une plus grande surface des feuilles, leur nombre étant identique. Les végétaux, tels que *Juncus maritimus*, adaptés aux sols marécageux, donc saturés d'eau, semblent avoir de grandes possibilités de transpiration (fig. 35) par suite peut-être d'une différence de potentiel efficace plus faible.

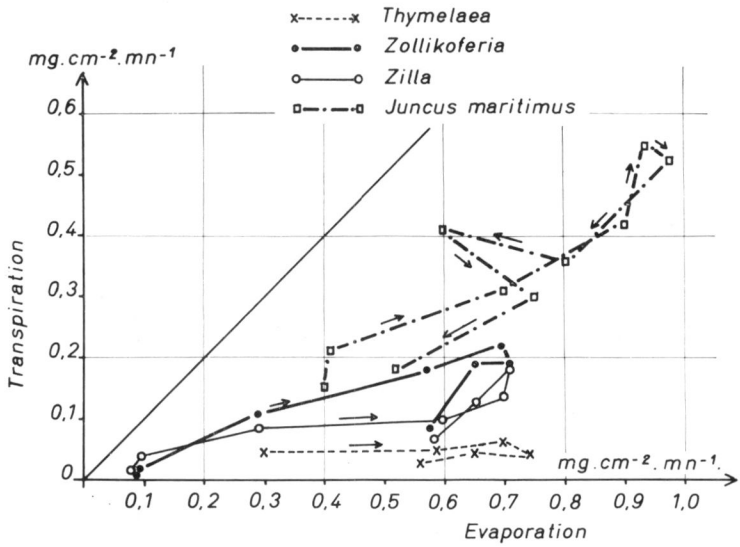


FIG. 35. — *Relation entre la transpiration et l'évaporation pour quelques plantes de zone désertique (Beni-Ounif) au cours de la journée. Les flèches indiquent le sens de l'évolution du matin jusqu'au soir* (adapté d'après STOCKER, 1956)

Le matin, les stomates sont généralement ouverts, et les valeurs de la transpiration sont assez voisines de celle de l'évaporation (fig. 34) ; les feuilles se comportent bien alors comme des surfaces totalement évaporantes. Dans certains cas, la transpiration est même supérieure à l'évaporation ; ce phénomène n'est pas significatif pour le maïs, mais il l'est fréquemment pour la betterave dont la surface des feuilles est plus lisse ; apparemment aberrants, de tels résultats s'expliquent par le choix de la surface évaporante standard qui ne remplissait pas toutes les conditions idéales.

42. — TRANSPIRATION RELATIVE T/E

Théoriquement, la transpiration doit être comparée à l'évaporation physique d'une surface dont les caractéristiques thermiques seraient identiques. Or, si la rugosité et la couche limite équivalente de la pastille d'évaporomètre Piche blanche utilisée pour ces mesures ne sont malgré tout pas trop différentes de celles des feuilles

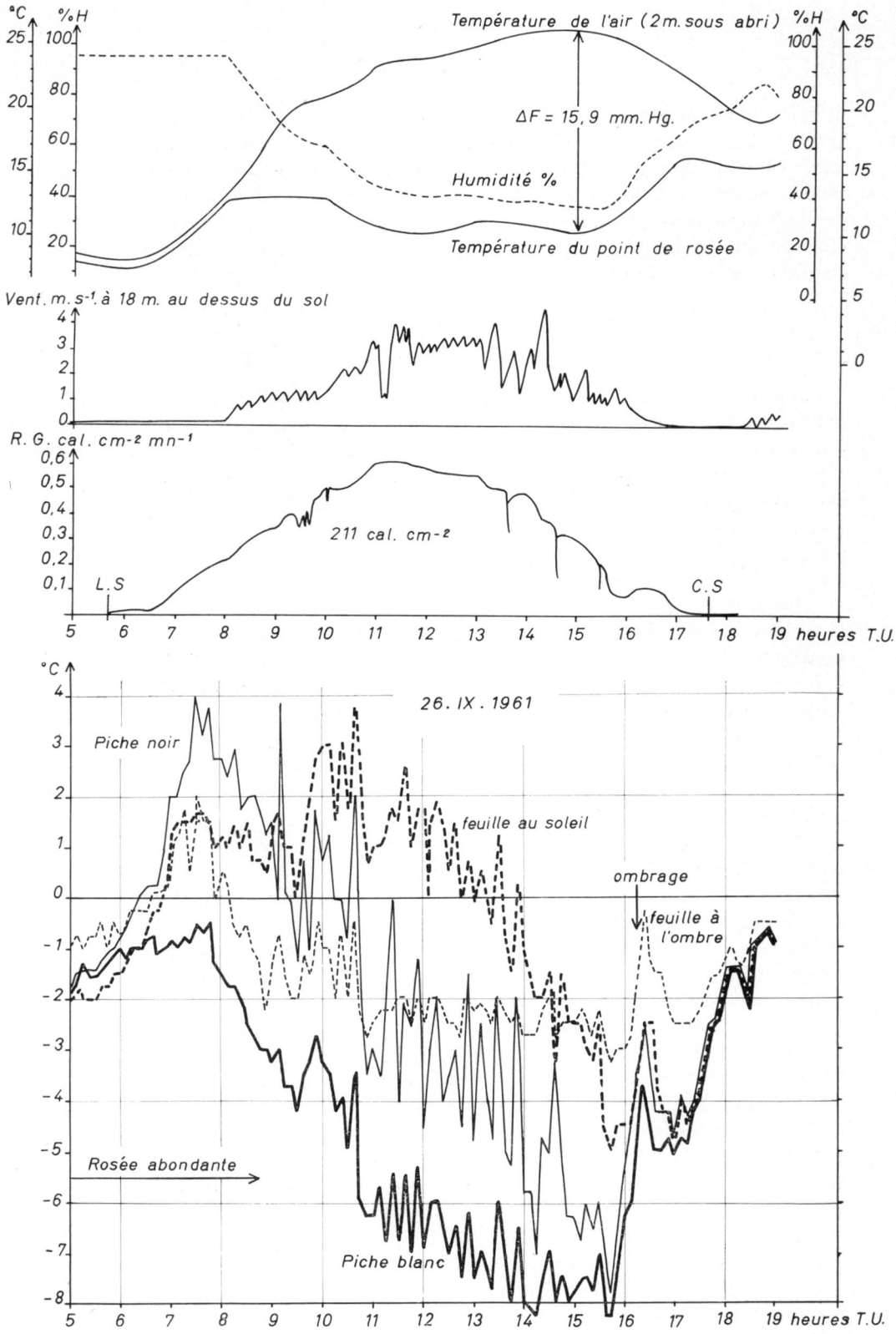


FIG. 36 — *Évolution des écarts de température par rapport à celle de l'air d'une feuille à l'ombre, d'une feuille au soleil, de pastilles d'évaporomètre Piche, blanche et noircie à l'encre de Chine, placées au soleil. Les feuilles et les pastilles étaient maintenues horizontales. Un pointé a été fait toutes les 7,5 minutes sur les courbes d'enregistrement. La radiation globale* (R. G.) *était mesurée grâce à une thermopile placée à* 18 m *au-dessus du sol. L'évaporation journalière mesurée sous abri a été de 2,4 mm. Versailles, 26. IX.1961.* (orig.)

utilisées, par contre, le pouvoir réflecteur, c'est-à-dire l'albédo, qui commande avec la régulation stomatique et cuticulaire la température de l'organe soumis au rayonnement, est très différent. L'albédo de la pastille Piche blanche est voisin de 90 p. 100, tandis que celui de la feuille varie de 15 à 20 p. 100 selon les cas. Il s'ensuit une température plus élevée de la feuille, donc un gradient de tension de vapeur plus fort, et une transpiration plus grande. Ces différences de température ont été mises en évidence grâce à des termocouples (fig. 36).

421. — *Analyse d'un cas particulier*

Sur la figure 36 sont reportés les écarts de température entre, d'une part, deux feuilles de betterave — dont l'une était artificiellement ombragée grâce à un écran — et deux pastilles d'évaporomètre Piche maintenues constamment humides — dont l'une était noircie à l'encre de Chine — et d'autre part, l'air ambiant. La partie supérieure de la figure donne les variations des données météorologiques permettant l'analyse climatologique de la journée considérée (26 septembre 1961). Quatre phases principales peuvent être distinguées : A. du lever du soleil (LS) à 9 h TU, B de 9 h à 13 h, C de 13 h à 16 h et D de 16 h au coucher du soleil (CS).

La première phase, A, correspond à une période pendant laquelle l'ensemble des feuilles était recouvert d'une rosée abondante ; l'évapotranspiration potentielle ponctuelle était faible (H voisin de 100 p. 100) surtout jusqu'à 8 h TU ; le vent était très faible. Les écarts de température sont dus aux différences d'albédo qui se situent dans l'ordre suivant : Piche noirci (a voisin de zéro), feuille (a voisin de 0,2), Piche blanc (a voisin de 1). La température de la feuille au soleil est plus proche de celle du Piche noir que celle du Piche blanc ce qui est logique. Un rayonnement global de 0,51 cal . cm^{-2}. mn^{-1} introduit déjà une différence de température qui peut atteindre 5°C selon l'albédo.

La deuxième phase, B, de 9 h à 13 h TU environ, correspond à la deuxième partie de la phase d'accroissement du rayonnement global. Le bilan d'énergie est positif ; la température de la feuille au soleil est supérieure à celle de l'air qui s'échauffe à son contact. L'abaissement considérable de la température du Piche blanc jusqu'à 8°C en dessous de l'ambiance est dû à l'accroissement du déficit de saturation et de la turbulence et par conséquent de l'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée. La température du Piche noir passe en dessous de celle de la feuille au soleil, indiquant une réduction de la transpiration par rapport à l'évaporation par suite de l'intervention de la régulation stomatique. Des mesures instantanées ont été faites vers 13 h TU (voir ci-dessous, § 424).

La troisième phase, C, de 13 h à 16 h correspond à une période de relative stabilité de la température sous abri, voisine du maximum, et du déficit de saturation de l'air, voisin de 15 mm de mercure ; mais la radiation est décroissante ; les températures de la feuille au soleil et de la pastille noire suivent le rayonnement et diminuent par rapport à celle de l'air. Le bilan énergétique devient négatif.

A partir de 16 h TU, phase D, l'ombre arrive sur la parcelle expérimentale et le rayonnement global devient négligeable à partir de 17 h. L'évapotranspiration potentielle instantanée étant plus faible, les stomates peuvent à nouveau s'ouvrir, les différences d'albédo ne jouent plus, les températures de la feuille au soleil et des

pastilles évaporantes se rejoignent. Malgré une rugosité moindre, la feuille étant de plus grande dimension que les pastilles, sa couche limite doit être un peu plus épaisse, sa température devrait donc être plus faible ; c'est ce qui s'est produit le matin avant le lever du soleil alors que la feuille était mouillée par la rosée et que par conséquent, sa transpiration était égale à l'évaporation qui était d'ailleurs très faible. Le soir, cet effet est probablement compensé par une transpiration plus faible que l'évaporation.

Quant à la feuille à l'ombre, ses fluctuations sont amorties et sa température reste plus proche de celle de l'air, tout en restant, dans l'ensemble de la journée, inférieure ; ceci est dû à la transpiration qui n'est pas compensée par le rayonnement.

Enfin, il est à noter que globalement, la température moyenne, au cours de la journée, de la feuille au soleil est très voisine de celle de l'air ce qui est parfaitement logique puisque le rayonnement n'échauffe pas directement l'air, mais les surfaces qui l'absorbent et que l'air s'échauffe ou se refroidit au contact de ces surfaces. En conséquence, des irrigations par aspersion pratiquées à une échelle suffisante, seraient susceptibles de modifier le climat par suite d'une diminution de la température de la surface des feuilles, de deux à trois degrés en moyenne dans le cas présent (sans compter l'effet sur l'humidité de l'air).

422. — *Correction d'albédo.*

Par suite des différences de température entraînées par les différences d'albédo des feuilles et des pastilles évaporantes, les mesures de transpiration et d'évaporation instantanées ne sont pas tout à fait comparables. Une modification correcte de l'albédo de la pastille évaporante pourra diminuer cette cause d'erreur : la température de la pastille serait alors plus proche de celle de la feuille, tout au moins lorsque les stomates sont ouverts (phase A). Une pastille colorée en vert devrait à priori convenir, mais la couleur visible est trompeuse, car la sensibilité de l'œil varie avec la longueur d'onde des rayonnements reçus ; or, il faudrait que l'albédo de cette pastille colorée soit identique à celui des feuilles pour toutes les longueurs d'onde, ce qui est assez difficile à réaliser. En fait, il semble que l'utilisation d'une pastille partiellement noircie à l'encre de Chine doive donner de meilleurs résultats ; en noircissant les quatre cinquièmes de la surface totale, l'ensemble aura un albédo moyen voisin de celui de la feuille.

423. — *Correction de température*

La différence d'albédo ne suffit pas à expliquer, sauf durant la phase A, les différences de température entre la feuille au soleil et les pastilles : la feuille au soleil est plus chaude que la pastille noircie. La deuxième cause de ces écarts vient de la régulation stomatique qui, réduisant la transpiration par rapport à l'évaporation de la pastille de référence, permet une élévation de température de la feuille. Aucun artifice technique de la méthode de mesure ne permet de résoudre cette difficulté directement. Mais, grâce à la comparaison des formules (1) et (2), il est possible de corriger cette erreur par le calcul (BOUCHET 1963) (fig. 37).

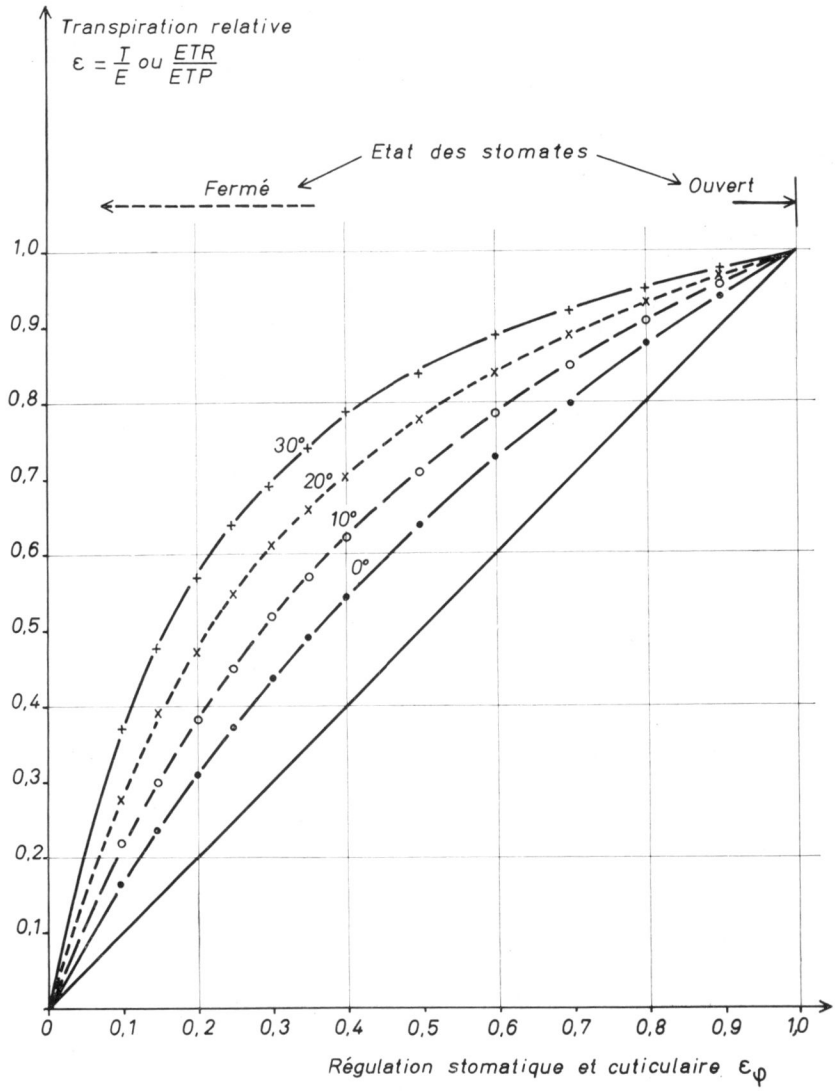


FIG. 37. — *Variation de* ε_φ *en fonction du rapport T/E pour différentes températures* (d'après BOUCHET, 1963)

424. — *Tranpiration relative corrigée* (ε_φ)

Compte tenu des remarques précédentes, la transpiration T d'une feuille peut donc être valablement comparée à l'évaporation physique d'une surface évaporante de caractéristiques analogues. Des formules (1) et (2) on peut déduire le rapport (3)

$$\frac{T}{E} = \varepsilon_\varphi \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \varepsilon_\varphi \lambda(\theta)}. \qquad (3)$$

Ce rapport T/E a été étudié dès 1906 par LIVINGSTON qui l'a appelé la transpiration relative ; il résulte directement des mesures de transpiration et d'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée étudiées ci-dessus. ε_φ correspond alors à la transpiration relative corrigée, c'est-à-dire à la mesure de la transpiration rapportée à la valeur calculée de l'évaporation que l'on aurait si la surface évaporante standard était à la même température que la feuille. ε_φ peut s'écrire :

$$\varepsilon_\varphi = \frac{T/E}{1 + \lambda(\theta)(1 - T/E)}. \qquad (3')$$

Cette expression représente la correction de température signalée ci-dessus. La figure 37 représente en fait un abaque qui permet le calcul de ε_φ en fonction de T/E et de θ (BOUCHET 1963).

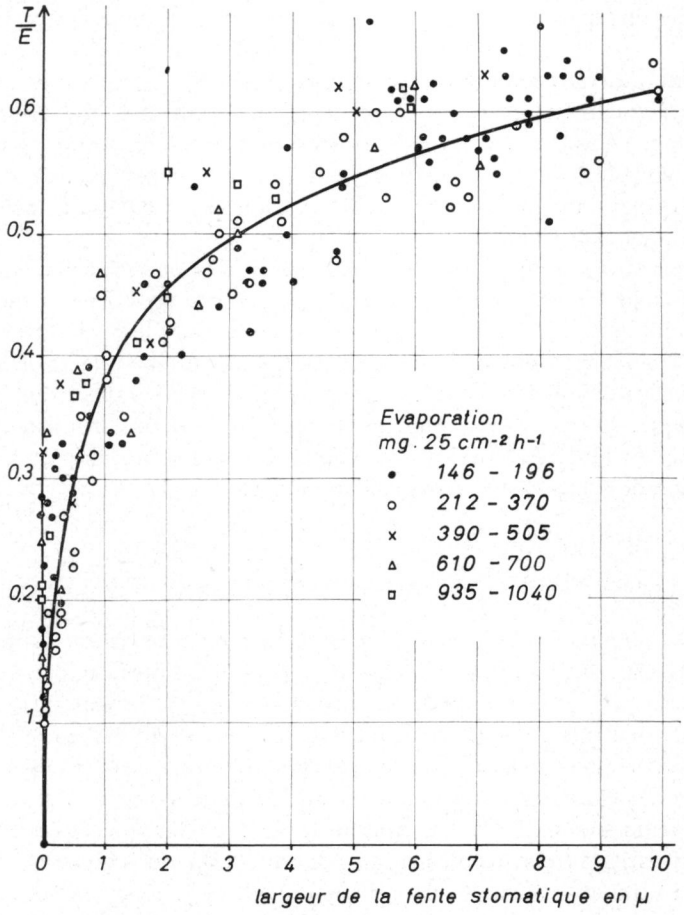


FIG. 38. — *Transpiration relative (T/E) en liaison avec l'ouverture des stomates pour des feuilles de Bouleau. La relation semble indépendante de l'évaporation mesurée avec du papier buvard vert. L'ouverture des stomates est la moyenne des mesures de plusieurs stomates* (d'après STÅLFELT, 1932)

Ainsi, le 26 septembre 1961 (fig. 36), une mesure de transpiration relative faite vers 13 h TU, avait donné :

$$T = 0{,}37 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mn}^{-1}$$

et,

$$E = 0{,}65 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mn}^{-1}$$

d'où :

$$\frac{T}{E} = 0{,}58.$$

D'après la figure 36, on peut voir que la température de la pastille évaporante était d'environ 7°C inférieure à celle de la feuille. La formule (3') donne alors $\varepsilon_\varphi = 0{,}3$. ε_φ représente la réponse physiologique des végétaux aux facteurs du climat ; cette grandeur est directement liée à la régulation stomatique et cuticulaire de la transpiration ; cette régulation est ainsi plus sévère que ne le laisse apparaître le rapport T/E.

Le figure 38 doit être rapprochée de la figure 37 ; l'analogie est évidente : la courbe de STÅLFELT constitue une sorte de vérification expérimentale du calcul théorique présenté par BOUCHET (1963) : ε_φ varie bien comme l'ouverture des stomates.

Le calcul n'est pas toujours possible mais le sens de la correction est connu et les résultats présentés ci-dessus (fig. 34 et 35) peuvent être interprétés : il suffit d'avoir présent à l'esprit que les valeurs mesurées de l'évaporation sont sous-estimées, ce qui se traduira, sur les figures 34 et 35 par exemple, par un glissement de l'ensemble des points vers la droite : la diminution relative de la transpiration sera donc encore plus accentuée.

La température de la pastille noircie (fig. 36) restant relativement voisine de celle de la feuille (l'écart excède rarement 3°C), il est possible de concevoir une méthode simplifiée dans laquelle on utiliserait une pastille entièrement noircie à l'encre de Chine. La différence d'albédo entre la pastille noircie et la feuille compenserait ainsi très grossièrement l'augmentation de température due à la régulation stomatique. Il est évident que cette méthode introduit des erreurs systématiques, mais elles sont plus faibles que pour des pastilles blanches et même vertes, si le correction de température n'est pas appliquée.

43. — VARIATIONS DE LA TRANSPIRATION RELATIVE

A titre d'exemple, l'évolution de la transpiration relative au cours du temps est représentée sur la figure 39 pour des mesures faites l'après-midi sur betterave. On peut remarquer, après une pluie supérieure à 10 mm et à évaporation égale, une très forte augmentation de la transpiration des feuilles prélevées sur les plantes témoins qui ont souffert de la sécheresse : la transpiration de ces dernières peut atteindre le double de celle des feuilles prélevées sur les plantes irriguées et ce phénomène persiste plusieurs jours. Il est toutefois utile de rappeler que l'indice foliaire des plantes irriguées était trois fois plus grand que celui des plantes témoins, si bien que la transpiration rapportée à l'unité de surface du sol de la zone témoin était tout de même inférieure ou au plus égale à celle de la zone irriguée : l'évapotranspiration réelle des deux cultures devait être voisine de l'évapotranspiration potentielle. Ce processus remarquable a permis une croissance importante des betteraves témoins

qui ont ainsi partiellement rattrapé leur retard sur les betteraves irriguées. Cette notion synthétique permet ainsi de mettre en évidence des réactions physiologiques mal connues.

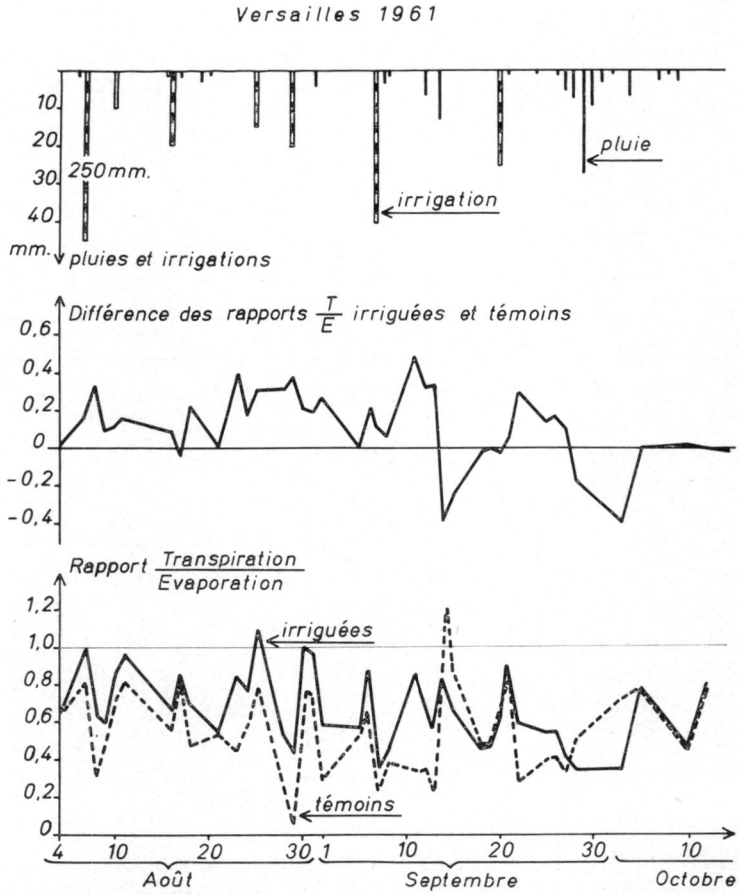


FIG. 39. — *Évolution de la transpiration relative (T/E) au cours du temps pour des betteraves irriguées et témoins. Évaporation mesurée avec pastille blanche* (orig.)

La transpiration relative (T/E) et surtout la transpiration relative corrigée (ε_φ) diminuent très rapidement lorsque l'évaporation (ou évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée) augmente (fig. 40). Dans les conditions naturelles, sous le climat parisien, la régulation stomatique est presque toujours la règle ; elle est plus accentuée pour le blé que pour le maïs. Cette constatation permet de penser que l'évapotranspiration potentielle instantanée constitue un facteur limitant de premier ordre durant la majeure partie de la vie des végétaux.

Dans le chapitre suivant, après avoir rappelé l'action complexe des différents facteurs climatiques sur la photosynthèse, on s'efforcera de dégager les conséquences des phénomènes de régulation stomatique sur la production de matière sèche en étudiant les relations entre la transpiration et l'assimilation apparente.

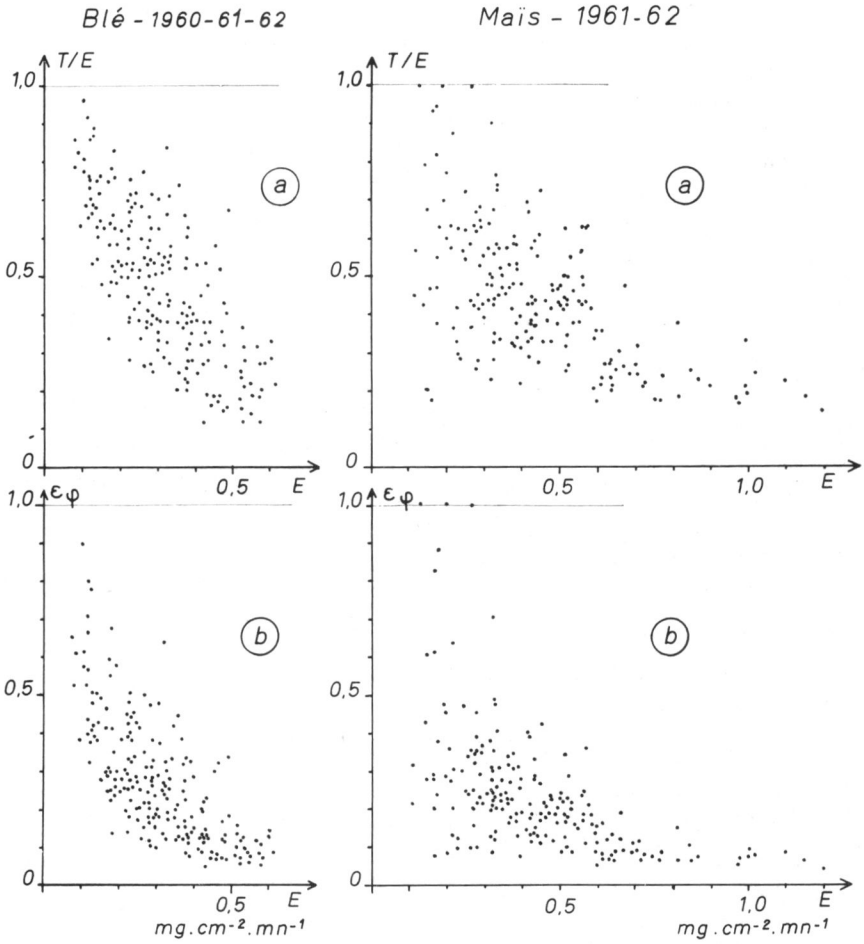


FIG. 40. — *Relation entre la transpiration relative (T/E), la transpiration relative corrigée (ε_φ) et l'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée pour le Blé et le Maïs dans la région parisienne. Les mesures ont été faites soit le matin vers 9 h TU, soit l'après-midi vers 13 h TU dans diverses conditions écologiques* (orig).

Chapitre V

PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE ASSIMILATION NETTE OU APPARENTE

Avant d'aborder l'étude de l'action du facteur eau sur l'assimilation nette ou apparente c'est-à-dire sur la production de matière sèche, il est nécessaire de replacer la plante dans son contexte climatique naturel. L'eau en effet n'est pas le seul facteur dont dépend l'assimilation chlorophyllienne. Les végétaux subissent toutes les variations du milieu dans lequel ils vivent.

51. — Complexes climatiques

L'action de certains facteurs peut parfois être étudiée isolément, mais les interactions sont généralement si complexes qu'il serait illusoire, dans la plupart des cas, de considérer chaque facteur d'une façon indépendante.

511. — *Expérimentation en conditions naturelles et contrôlées*

En conditions contrôlées (chambres climatisées, phytotrons...), on se propose, selon la méthode classique de laboratoire, de faire varier un seul facteur en maintenant les autres aussi constants que possible. Cette méthode est impossible à appliquer dans les conditions naturelles car les facteurs climatiques fluctuent constamment dans le temps et l'espace ; de plus toute variation d'un facteur se répercute sur les autres : ainsi, si le rayonnement augmente, la température s'élévera, l'humidité de l'air s'abaissera, le vent pourra en être affecté, etc. Les conditions particulièrement instables auxquelles sont soumises les cultures en plein champ sont donc très différentes des conditions constantes qu'une plante isolée peut subir au laboratoire. Il est difficile de savoir dans quelle mesure les résultats obtenus dans ces dernières conditions peuvent être extrapolés aux premières. Malgré tout, les études en conditions artificielles sont très utiles dans beaucoup de cas pour comprendre certains phénomènes vitaux et permettre ainsi l'émission d'hypothèses qui guideront l'expérimentation en plein champ ; mais elles ne sauraient être suffisantes notamment pour l'étude des rendements ou de la production de matière sèche.

L'esprit humain est malheureusement inapte à saisir d'un seul coup l'action synthétique d'un complexe aussi changeant que le complexe climatique dans lequel se trouvent les plantes. L'analyse des phénomènes poussée jusqu'à l'étude d'un fac-

teur isolé (température, lumière, eau, gaz carbonique...) est dangereuse, car elle conduit à négliger les *interactions* qui sont presque toujours essentielles. Il faut donc trouver un procédé d'étude différent qui tienne compte de ces contingences.

Selon la méthode définie par H. GESLIN (1944) à propos du blé, on peut observer la plante telle qu'elle se trouve dans son milieu normal et contrôler l'ensemble des facteurs qui influent sur sa croissance ; des relations peuvent alors être établies entre le développement ou la croissance et les facteurs climatiques considérés comme prépondérants ; les déviations ne sont pas dues au hasard, mais à des causes d'importance seconde qui peuvent alors être mises en évidence ; de proche en proche, l'analyse complète des phénomènes peut ainsi être poursuivie. Cette analyse du complexe climatique en fonction de la plante permet d'une part, de déterminer l'influence effective de chacun des facteurs considérés isolément et d'autre part, de mettre en évidence leurs interactions ; on obtient de la sorte des lois expérimentales exprimant l'action de ce complexe sur le comportement des végétaux.

512. — *Étude succincte de quelques complexes climatiques*

Il serait difficile d'étudier tous les facteurs climatiques simultanément. Heureusement, les groupements de facteurs prépondérants dont il vient d'être question suffisent souvent à rendre compte d'une façon satisfaisante de la réalité ; en explicitant les facteurs en cause, chacun de ces groupements correspond à un complexe climatique défini dans des conditions bien précises.

En supposant les besoins en eau satisfaits, H. GESLIN (1952) a fait l'étude du complexe chaleur-lumière. C'est ainsi qu'il existe un décalage de phase entre la

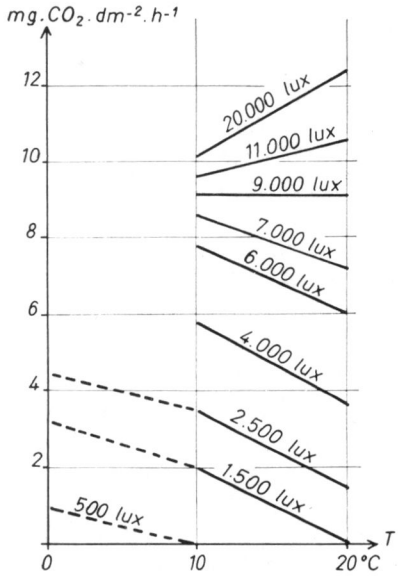


FIG. 41. — *Assimilation nette de* Chamaenerium *en fonction de la température pour différentes intensités lumineuses* (d'après MÜLLER, 1928)

marche annuelle de la température et de la radiation globale. A Paris, le maximum de température se produit en juillet-août alors que le maximum de radiation s'observe au solstice de juin. Aux équinoxes, à radiation égale, la température est très différente. Les serres modifient considérablement le complexe chaleur-lumière, par diminution du rayonnement de courtes longueurs d'onde et augmentation de la température ; la croissance et le développement des végétaux en sont très affectés, car ils dépendent pour une bonne part de l'équilibre entre ces facteurs. Dans le cas du développement, l'action de ce complexe se traduit par l'indice héliothermique (GESLIN, 1944).

La photosynthèse, donc la production de matière sèche, dépend aussi de ce complexe chaleur-lumière (fig. 41). Il serait nécessaire de connaître la valeur critique de l'intensité lumineuse (9 000 Lux pour le *Chamænerium*) pour laquelle l'assimilation est indépendante de la température pour toutes les plantes que l'on désire étudier en conditions contrôlées ; les intensités couramment employées sont généralement inférieures à cette valeur critique et la température devrait alors être maintenue aussi basse que possible pour favoriser au maximum la production de matière sèche. Lorsque les intensités lumineuses sont fortes, la température en conditions contrôlées tend à croître exagérément (fig. 26) et un refroidissement énergique serait nécessaire. Ce problème se pose également en agriculture pour certaines cultures en serre. Hors des conditions naturelles, l'expérimentation est donc difficile à mener car les conséquences des modifications artificielles du milieu sont souvent mal connues et peu prévisibles.

Les études de physiologie au laboratoire ont souvent conduit à étudier l'action simultanée de plusieurs facteurs (fig. 42). En supposant toujours les besoins en eau

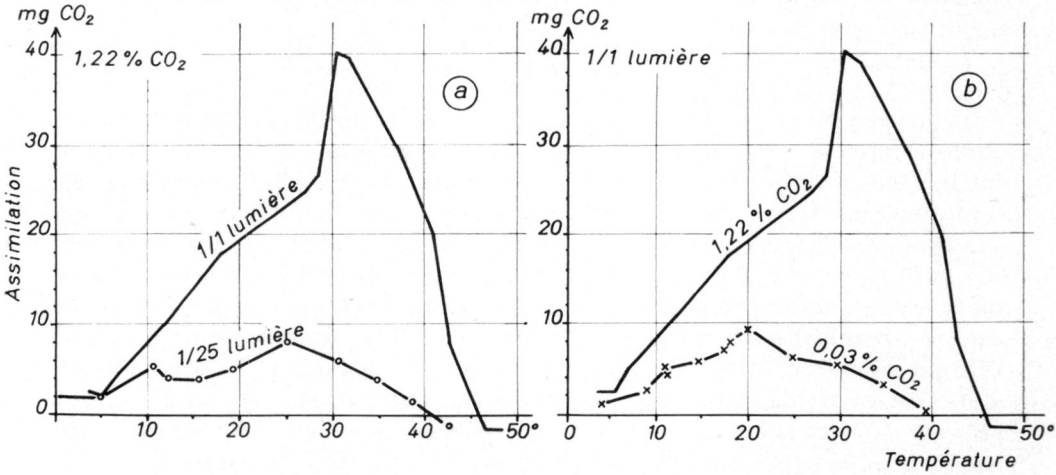


FIG. 42 *a* et *b*. — *Photosynthèse apparente de la Pomme de terre* (Solanum tuberosum) *en fonction de la température pour diverses intensités lumineuses et teneur en* CO_2. *1/1 lumière = pleine lumière du jour* (d'après LUNDEGÅRDH, 1924)

satisfaits, la nécessité d'une étude synthétique est bien mise en évidence grâce à cette figure. Il s'en dégage une notion d'optimum d'action de la température se déplaçant vers les températures élevées lorsque l'intensité lumineuse ou la teneur en gaz carbonique croissent. Il n'existe donc pas de valeur absolue pour un facteur déter-

miné, mais des valeurs relatives valables dans un contexte climatique bien précis.

La satisfaction des besoins en eau admise ci-dessus est rarement réalisée. L'étude faite dans les chapitres précédents a montré que l'action du facteur eau, présenté sous l'aspect de l'évapotranspiration potentielle ponctuelle instantanée, est elle-même complexe et ne peut être séparée de l'action des autres facteurs climatiques (température, rayonnement, vent...). Il faut donc chercher à exprimer l'action simultanée de tous les facteurs dont dépend la croissance des végétaux.

La formule (4) présentée dans le premier chapitre est un essai de synthèse de l'influence du complexe sur l'assimilation nette ou apparente (Ass) :

$$\mathrm{Ass} = \mathrm{C} \cdot \Phi(\mathrm{Rg}) \cdot \Delta p \cdot \frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z} = \mathrm{C} \cdot \Phi(\mathrm{Rg}) \cdot \Delta p \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \frac{u^{0,5}}{\Gamma(l)}. \tag{4}$$

La constante C englobe tous les facteurs non explicités, en particulier l'alimentation minérale ; on les supposera à l'optimum.

Une formule de ce genre n'est qu'une représentation simplifiée, donc partiellement fausse, des phénomènes : elle constitue par contre une aide précieuse, un support pour orienter les raisonnements et permettre l'émission de nouvelles hypothèses de travail.

52. — Mesure de la photosynthèse apparente

Compte tenu des phénomènes physiques (couche limite, bilan thermique), mis en évidence dans les chapitres précédents, il s'agit maintenant de voir succinctement comment la photosynthèse peut être appréciée d'une façon satisfaisante dans les conditions naturelles.

521. — *Méthodes*

Comme pour l'évapotranspiration (cf. § 331), la meilleure méthode serait théoriquement la méthode aérodynamique dont le principe repose sur la mesure des gradients de la teneur en gaz carbonique dans l'air, mais elle nécessite des calculs complexes. Actuellement, la méthode la plus sûre semble être celle qui consiste à faire des pesées de matière sèche : les feuilles peuvent suffire (Slatyer 1961, Rychnovska et Bartos 1962). Les chercheurs russes ont mis au point une méthode basée sur le dosage du carbone radioactif dans des plantes alimentées en gaz carbonique marqué ; dans la mesure où elle peut être utilisée dans les conditions naturelles sans perturber le milieu, cette méthode est susceptible de donner des résultats intéressants. Par contre, la méthode qui consiste à employer une enceinte fermée est, en principe, à éviter par suite des modifications considérables et inconnues du milieu que cette enceinte provoque (fig. 26 et tabl. 10).

522. — *Résultats*

Nous présenterons et discuterons malgré tout quelques résultats obtenus en enceinte fermée, car la méthode aérodynamique est récente et pratiquement, il n'existe pas de résultats publiés. Quant aux pesées de matière sèche, elles ne portent généralement que sur le rendement total.

L'assimilation varie au cours de l'année (WILLSTÄTTER et SOLL, 1918) et au cours de la journée ; en zone arctique (KOSTYTSCHEW et *al.* 1930) et en haute montagne (tabl. 11), les conditions hydriques sont favorables et la lumière, malgré

TABLEAU 11

Valeurs maximales de l'assimilation et de la respiration exprimées en milligrammes de CO_2 par dm² de surface foliaire (une seule face) et par heure pour un certain nombre de plantes dans différentes zones climatiques
(d'après ZALENSKIJ, 1954)

Zone climatique	Nombre d'espèces	Photosynthèse	Respiration
Arctique	17	4-21	2-11
Forestière et steppique	56	2-26	3-20
Subtropicale	20	3-49	2-15
Désertique	26	2-69	9-26
De haute montagne	63	4-100	5-35
Tropicale	28	1-19	0,1-1

ses variations, reste souvent le seul facteur limitant. Les nuages peu épais et surtout les brouillards sont favorables à l'assimilation chlorophyllienne car l'évapotranspiration potentielle instantanée est alors relativement faible. Par temps ensoleillé au contraire, ce facteur climatique devient limitant et l'assimilation nette peut décroître considérablement (fig. 43). STOCKER (1930) a schématisé les

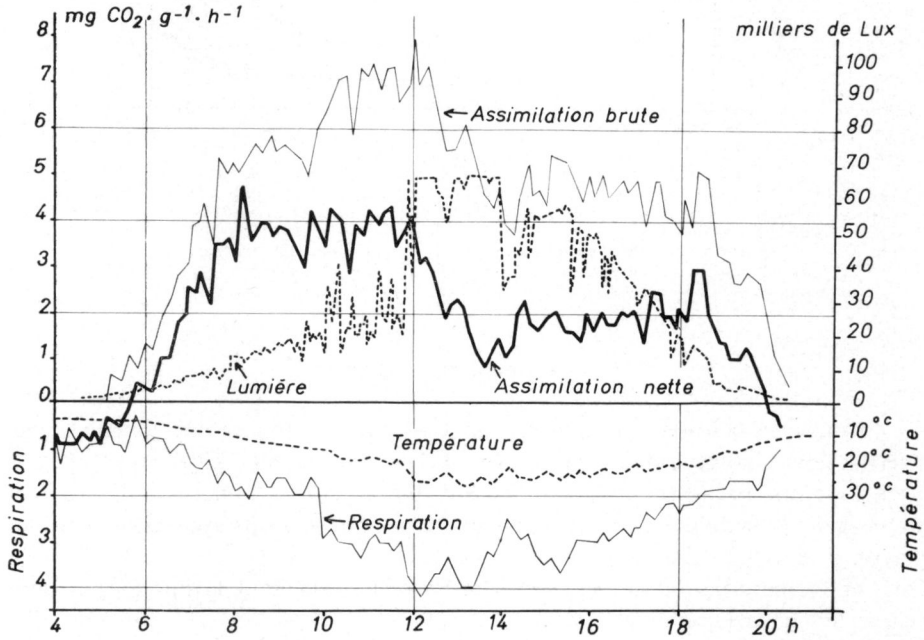


FIG. 43. — *Lumière, Assimilation nette et brute (mg CO_2 par gramme de poids sec et par heure), Respiration et Température. Epicea. Ciel couvert jusqu'à midi* (d'après PISEK et TRANQUILLINI, 1954)

différentes évolutions journalières possibles de la photosynthèse (fig. 44). Les courbes obtenues sont sensiblement analogues à celles de la transpiration (fig. 32) ; mais comme nous le verrons plus loin (fig. 56), la dépression de midi est généralement beaucoup plus accusée pour la photosynthèse que pour la transpiration. Ce phénomène peut être mis en relation avec l'importance de la régulation stomatique et cuticulaire (ε_φ)

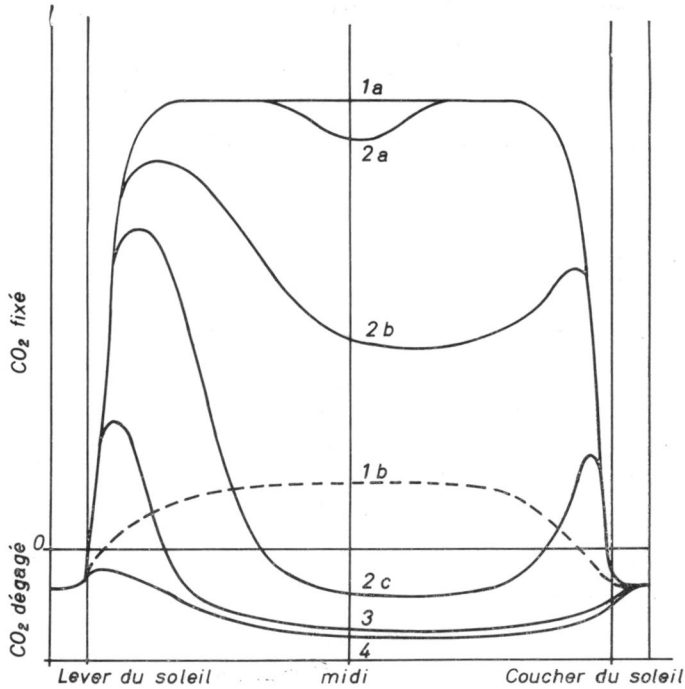


FIG. 44. — *Schéma de l'évolution journalière possible de la photosynthèse.*
1. *Type symétrique à un seul sommet correspondant à une alimentation en eau optimale, mais le palier* (1a) *dénote l'existence d'un facteur limitant qui peut être l'évapotranspiration potentielle instantanée ;* 1a, *temps ensoleillé ;* 1b, *temps nuageux.*
2. *Type à deux sommets, déséquilibre hydrique manifeste s'accentuant de* 2a *à* 2c.
3. *Type asymétrique à un sommet, alimentation hydrique très défavorable.*
4. *Alimentation hydrique encore plus défavorable* (d'après STOCKER, 1960).

53. — FACTEURS LIMITANTS

Si dans un contexte climatique donné, il existe toujours un niveau optimal d'action pour chaque facteur dont dépend l'assimilation chlorophyllienne (cf. §, 522) il y a toujours un facteur qui, à un instant donné, limite la photosynthèse ; mais il est souvent difficile à mettre en évidence. C'est pourquoi l'importance relative de chacun d'entre eux est mal connue.

Les facteurs limitants essentiels d'ordre climatique sont la lumière, la température, le gaz carbonique et l'eau.

L'action de l'eau sur la production de matière sèche faisant le propos de ce mémoire, nous lui réserverons le paragraphe 54 en entier.

531. — *Lumière et température*

Les plantes vertes et quelques autres organismes sont capables de convertir l'énergie lumineuse (longueurs d'onde comprises entre 4 000 et 10 000 Å) en énergie chimique potentielle (BASSHAM et CALVIN, 1959). Au-dessous d'une certaine intensité énergétique, appelée point de compensation (fig. 45), l'assimilation nette ou

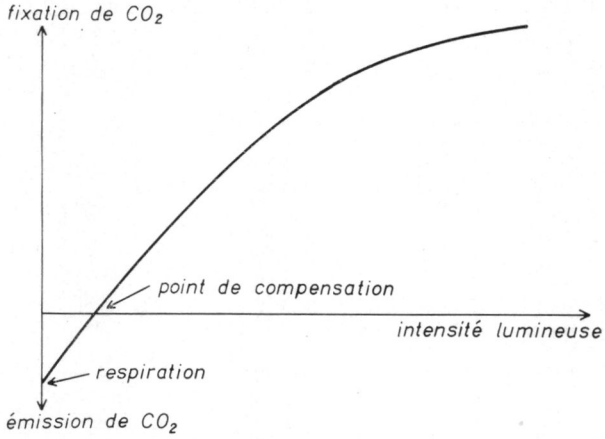


FIG. 45. — *L'activité photosynthétique croît comme l'intensité lumineuse. Au point de compensation la photosynthèse brute équilibre la respiration* (d'après BONNER et GALSTON, 1952)

apparente est nulle. Ce seuil est plus faible pour les plantes d'ombre que pour celles de lumière (BOYSEN-JENSEN et MULLER, 1929, CARTELLIERI, 1940). La photosynthèse ne croît pas indéfiniment avec la lumière (tabl. 12) ; il est difficile de dire si cette saturation est due directement à la lumière ou à des facteurs secondaires (élévation de température, diminution de la teneur en eau, etc.)

Pour certaines plantes aquatiques croissant en pleine lumière (*Potamogeton densus, Proserpinaca palustris*), les facteurs secondaires liés à l'excès de lumière n'intervenant pas, il n'y a pas encore de saturation pour les intensités lumineuses de 80 000 lux (GESSNER, 1938). Il en est de même pour des plantes telles que *Sieversia reptans* et *Doronicum clusii*, poussant dans des régions arctiques où la température reste toujours relativement basse (CARTELLIERI, 1940). Les mauvaises conditions d'alimentation minérale abaissent le palier de saturation (MULLER, 1932).

Ces phénomènes de saturation facilement observables pour une plante ou une feuille isolées (tabl. 12) dans des conditions plus ou moins artificielles, n'existent pratiquement jamais pour les cultures. BLACKMAN et BLACK (1959) ont montré qu'à l'échelle agronomique, le point de compensation moyen était généralement beaucoup plus élevé et que la saturation ne se produisait presque jamais pour une culture normale dont l'indice foliaire est suffisant (MOSS et *al.*, 1961).

Mais d'autres facteurs limitants plus ou moins liés au rayonnement interviennent très fréquemment pour limiter la photosynthèse à des valeurs assez faibles (fig. 46). Notre méconnaissance des exigences des plantes au point de vue de la

TABLEAU 12

Taux maximum de photosynthèse apparente, intensité lumineuse saturante et point de compensation de diverses plantes
(d'après FERRY et WARD, 1959)

Espèces	Organe utilisé pour la mesure	Lumière saturante (*foot-candle*) (1)	Point de compensation (*foot-candle*)	CO_2 fixé à saturation $mg \cdot dm^{-2}.h^{-1}$
Elodea	Plante	10 000		
Pinus taeda	Plante	9 000	300	3,5
Pinus sylvestris	Plante	6 400		3,0
Blé	Plante	5 300		
Luzerne	Plante	4 700		
Betterave à sucre	Plante	4 400		
Pommier	Plante	4 400		4,5
Coton	Feuille	3 500	150	18,0
Cornouiller	Plante	3 500		3,1
Pomme de terre	Feuille	3 000		14,0
Tournesol	Feuille	3 000	100	18,0
Tomate	Feuille	2 500	150	21,0
Tabac	Feuille	2 500	200	15,0
Maïs	Feuille	2 250		16,0
Soja	Feuille	2 200	200	17,0
Haricot	Feuille	2 200	100	20,0
Ricin	Feuille	2 100	200	18,0
Coleus	Feuille	2 000	75	8,0
Chêne blanc	Plante	2 000		5,2
Chêne rouge	Plante	1 500	300	6,0
Oxalis	Feuille	1 000	50	4,0
Saintpaulia	Feuille	1 000	50	5,0
Nephrolepis	Feuille	600	50	2,0
Philodendron	Feuille	500	25	4,0
Dryopteris	Feuille	200	25	3,0

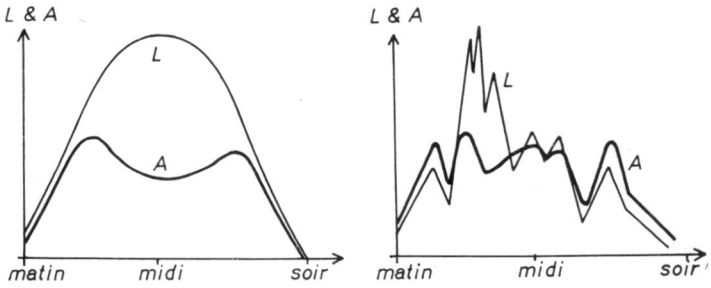


FIG. 46. — *Schéma de l'évolution journalière de la lumière et de l'assimilation nette par temps clair en été (à gauche) et par temps couvert (à droite). La dépression de midi de l'assimilation nette par temps clair est due à un bilan hydrique défavorable. (cf. fig. 32) Par temps nuageux, l'assimilation nette est relativement plus forte car le bilan hydrique reste favorable* (d'après PISEK, 1956).

qualité de la lumière constitue une autre difficulté dans l'étude de ce problème (DURAND, 1960). C'est pourquoi il est pratiquement impossible à résoudre en conditions artificielles.

(1) foot-candle = 10,794 lux.

La photosynthèse est généralement insignifiante au-dessous de 0°C et elle s'annule au-delà de 40°C (fig. 42 et PISEK et WINKLER, 1959). Entre ces limites, la température est un facteur limitant secondaire : elle résulte en général du bilan énergétique des rayonnements auxquels les végétaux sont soumis et de ce fait, est inséparable de la lumière (fig. 41 et 42).

532. — *Gaz carbonique*

Il y a longtemps que l'on sait que les plantes ont besoin de gaz carbonique pour leur assimilation. La fumure carbonique est actuellement employée avec succès, notamment en Hollande et en France pour les cultures de laitues en serre (JACOBS et VAN WINDEN, 1962).

5321. — *Action du gaz carbonique sur la photosynthèse.*

Le rôle du gaz carbonique sur la photosynthèse est primordial (fig. 47 et 48). Toutes les espèces ne réagissent pas de la même manière, mais une augmentation de la concentration en gaz carbonique est toujours favorable, tout au moins dans certaines limites souvent mal connues : à 0,3 p. 100 de CO_2, les feuilles de tomates présentent des nécroses au bout de deux semaines (BONNER et GALSTON, 1952).

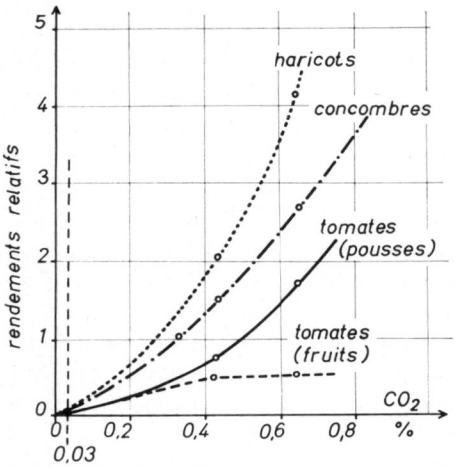


FIG. 47. — *Relation entre les rendements et la teneur en CO_2 dans l'air ; les rendements sont exprimés par le quotient entre la croissance et le CO_2 : par exemple, si pour une élévation de teneur en CO_2 de 51 p. 100 on obtient une augmentation de rendement de 74 p. 100, le rendement relatif sera 74 : 51 = 1,45* (d'après LUNDEGARDH, 1924).

Ce facteur limitant de première importance présente l'avantage sur les autres d'être relativement indépendant : il est possible de faire varier la teneur en gaz carbonique sans modifier de façon sensible les autres facteurs climatiques. Mais malgré cet avantage, il semble que les chercheurs ne se soient pas beaucoup préoccupés de ce problème jusqu'à présent, si en on juge par le petit nombre de travaux publiés dans ce domaine.

La question de savoir si le gaz carbonique pénètre dans la feuille par les sto-

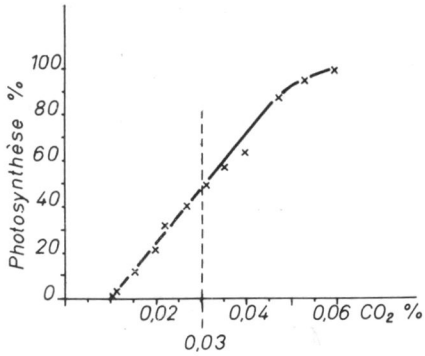


FIG. 48. — *Relation entre la photosynthèse (en p.* 100 *de la valeur pour* 0,06 *p.* 100 *de* CO_2*) de* Pinus taeda *et la teneur en* CO_2 *dans l'air* (d'après BRIX, 1962)

mates seuls ou par ceux-ci et par diffusion à travers la cuticule a été longtemps controversée. WHITEHEAD (1957) relate des expériences qui semblent montrer que la plus grande partie des échanges gazeux a effectivement lieu par les stomates.

5322. — *Variations climatiques de la teneur en gaz carbonique.*

Il est couramment admis que la teneur moyenne en gaz carbonique de l'air est de 300 p.p.m. ou 0,03 p. 100. Cette valeur ne rend pas bien compte de la réalité ; on peut la comparer à la valeur moyenne annuelle de la température à Versailles, 10°C, qui est exacte mais insuffisante pour étudier les phénomènes biologiques au cours de l'année.

La concentration en gaz carbonique de l'air varie considérablement au cours de l'année et de la journée, même à dix-huit mètres d'altitude (fig. 49). Les fluctuations les plus importantes ont lieu en été : des écarts de 170 p.p.m. peuvent être enregistrés entre le minimum et le maximum journalier, des écarts moyens de 70 p.p.m. sont la règle durant la période estivale.

Quelles sont les causes et les conséquences de ces variations ? Pourquoi les maximums fluctuent-ils davantage que les minimums ? Autant de questions auxquelles il n'est possible de donner que des réponses partielles. La fluctuation journalière est certes due à l'activité photosynthétique qui consomme davantage de gaz carbonique en été qu'en hiver. En été, la température du sol étant plus élevée, la décomposition des matières organiques est active et l'émission de gaz carbonique relativement importante, ce qui explique probablement les fortes valeurs des maximums. La teneur en gaz carbonique varie non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace (fig. 50). Les gradients les plus forts se trouvent au voisinage du sol qui est source de gaz carbonique : des teneurs de 3 000 p.p.m. ont pu être mesurées à quelques centimètres au-dessus du sol. Les profils (fig. 50) évoluent au cours de la journée et c'est au moment où l'évapotranspiration potentielle instantanée est la plus forte que la teneur en gaz carbonique est la plus faible. Ce phénomène aura tendance à accroître la dépression de la photosynthèse durant l'après-midi même si les stomates restent ouverts, provoquant ainsi une consommation d'eau non efficace.

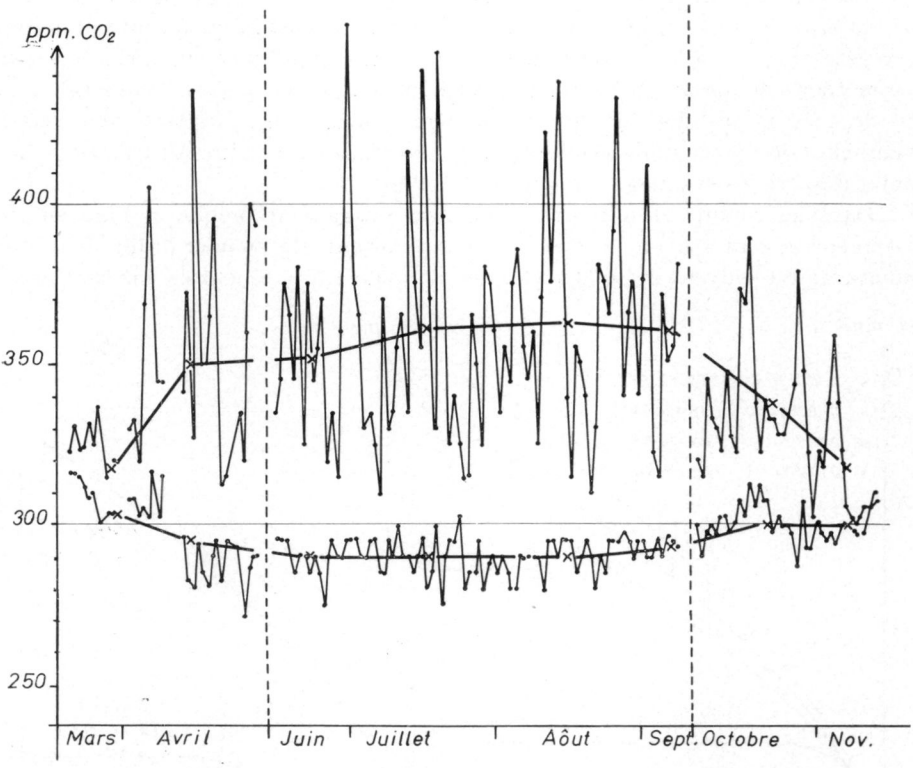


FIG. 49. — *Maximums et minimums journaliers de la teneur en CO_2 pendant la période de végétation en* 1952 *à* 18 *mètres d'altitude au-dessus d'un champ de céréales : les moyennes mensuelles sont indiquées. Mesure effectuée par un appareil à absorption dans l'infrarouge* (d'après HUBER et POMMER, 1954)

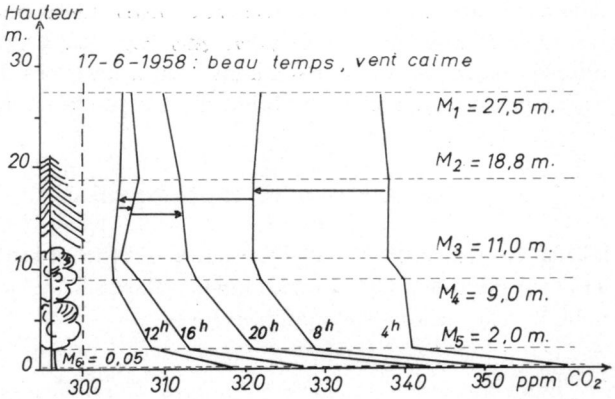


FIG. 50. — *Évolution journalière des profils de la teneur en CO_2 dans une forêt de mélèzes et de hêtres* (d'après MILLER et RUSCH, 1960)

Par ailleurs, lorsqu'il y a assimilation chlorophyllienne, les profils de teneur en gaz carbonique (fig. 50) présentent des points de rebroussement au niveau actif de la végétation ; les mesures de teneur en gaz carbonique peuvent ainsi constituer une méthode de mesure de l'activité photosynthétique (cf. § 521) ; un certain nombre de précautions doivent être prises pour corriger les variations horizontales éventuelles de teneur d'où résulterait une advection, c'est-à-dire un transport horizontal (MONTEITH et SZEICZ 1960, LEMON 1960).

Dans les conditions naturelles, la teneur en gaz carbonique et l'intensité du rayonnement sont souvent les deux facteurs limitants de premier ordre ; leur étude simultanée est souvent indispensable (fig. 51) : suivant la teneur en gaz carbonique,

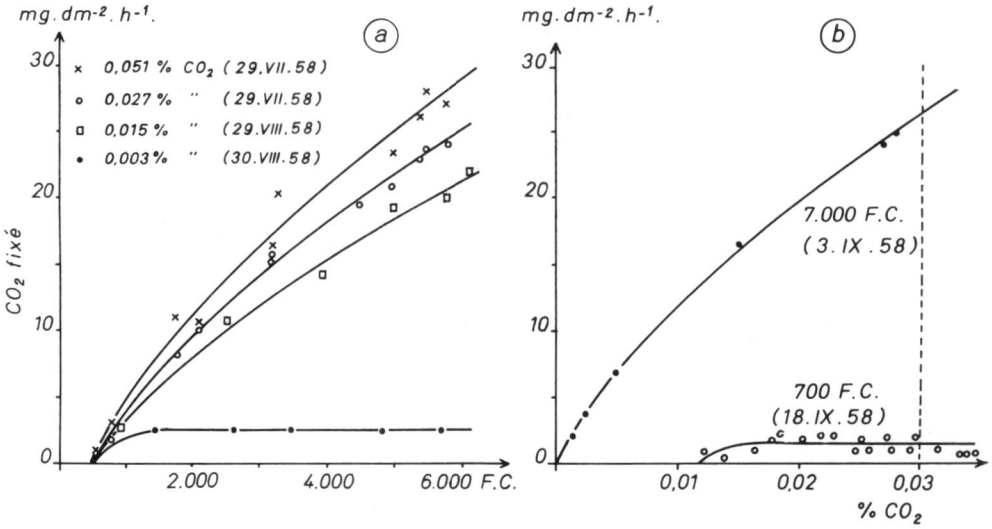


FIG. 51 *a* et *b*. — *Photosynthèse apparente du Maïs en fonction de la lumière, en foot candles, et de la teneur en* CO_2 (d'après MOSS et *al.*, 1961)

il y a ou non saturation de la photosynthèse aux fortes intensités lumineuses. Il semble donc bien, comme nous l'avons déjà vu plus haut (cf. § 531), que ces phénomènes de saturation, souvent considérés comme dus à un excès de lumière, sont en réalité la conséquence d'un autre facteur limitant (gaz carbonique, température, état hydrique, etc.).

54. — FACTEUR EAU ET PHOTOSYNTHÈSE

Pour que les plantes ne souffrent pas d'un manque d'eau, il faut non seulement que le sol leur permette d'en disposer abondamment, mais encore que l'évapotranspiration potentielle instantanée ne soit pas trop forte.

541. — *Évapotranspiration, facteur limitant de la photosynthèse*

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, que pour maintenir turgescents les cellules stomatiques et les autres tissus vivants de la plante, la quantité d'eau absorbée par unité de temps devait être égale à la quantité transpirée. Si

l'absorption est inférieure à la transpiration, les cellules vivantes perdent leur turgescence, les dimensions des cellules stomatiques diminuent, les stomates se ferment. Ces derniers, outre le débit de vapeur d'eau, règlent celui de l'oxygène et surtout celui du gaz carbonique nécessaire à l'assimilation chlorophyllienne (cf. § 5322). Quelles que soient les autres conditions, la production de matière sera nulle si les stomates sont fermés (EDMOND et *al.* 1953).

Leur action quantitative sur la photosynthèse ne peut être étudiée séparément de celle de l'intensité lumineuse (fig. 52). Dans la mesure où d'autres facteurs limi-

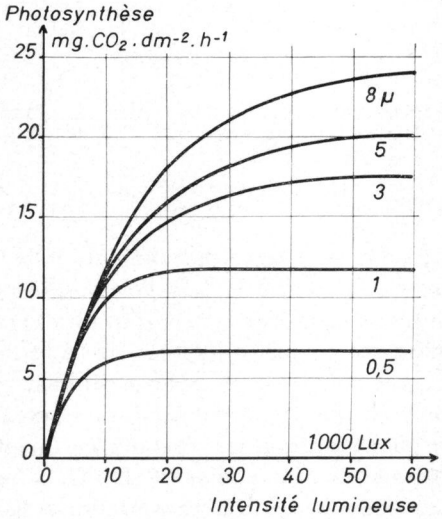


FIG. 52. — *Assimilation de l'Avoine en fonction de l'intensité lumineuse pour différentes ouvertures des stomates à des températures de* 17 *à* 20 °*C et avec une teneur en* CO_2 *dans l'air de* 0,03 *p.* 100 (d'après STÅLFELT, 1935)

tants n'interviennent pas, l'assimilation chlorophyllienne sera d'autant plus active que les stomates seront plus ouverts et la lumière plus forte. Ces deux conditions sont rarement réalisées simultanément, car, comme nous l'avons vu, les fortes intensités lumineuses provoquent très souvent un déséquilibre hydrique défavorable à l'ouverture des stomates (fig. 1).

Il n'est pas certain que l'accroissement de la résistance à la diffusion du gaz carbonique par suite de la fermeture des stomates soit la seule cause de la réduction de la photosynthèse. Il est probable que le déficit hydrique des feuilles agit directement sur les processus photosynthétiques au niveau de la cellule. Cette action directe pourrait expliquer les diminutions de l'assimilation nette au-dessous du point de compensation que l'on observe parfois au milieu de la journée (fig. 56). Ce problème est difficile à résoudre, car l'ouverture des stomates est étroitement liée au déficit hydrique des feuilles (cf. § 321 et fig. 22).

En tout état de cause, le déficit hydrique joue un rôle important (fig. 53) : la photosynthèse est indépendante du DPD. tant qu'il est inférieur à 5 ou 6 atmosphères ; elle décroît ensuite rapidement pour s'annuler lorsqu'il atteint 12 à 15 atmosphères.

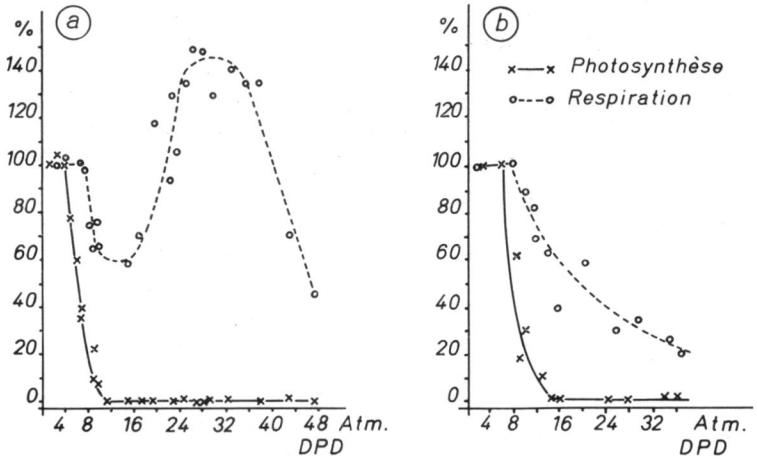


FIG. 53. — *Effet de l'état hydrique des feuilles (DPD) sur la photosynthèse et la respiration de plantules de* Pinus taeda (a) *et de Tomate* (b) (d'après BRIX, 1962)

Le vent accélère les échanges gazeux par diminution de l'épaisseur de la couche laminaire limite ; il augmente ainsi à la fois l'évapotranspiration potentielle instantanée et la photosynthèse. Tant que l'évapotranspiration potentielle instantanée sera suffisamment faible pour ne pas constituer un facteur limitant de la photosynthèse, cette dernière s'accroîtra avec la vitesse du vent ; par contre, l'action du vent devient défavorable lorsque l'évapotranspiration potentielle instantanée commence à déséquilibrer le bilan hydrique des végétaux, ce qui est le cas le plus fréquent.

Les remarques précédentes vont permettre de mieux comprendre les résultats suivants. Il y a parfois parallélisme entre la transpiration et la photosynthèse (fig. 54).

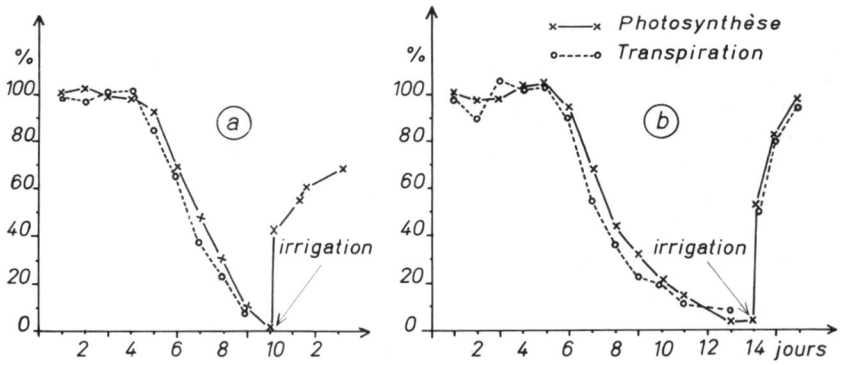


FIG. 54. — *Taux de photosynthèse et de transpiration de la Tomate* (a) *et du* Pinus taeda (b) *en fonction de la décroissance de l'humidité du sol et après irrigation. En abscisses, le nombre de jours après la dernière irrigation* (d'après BRIX, 1962)

Cette expérience ayant été menée en conditions contrôlées, on peut admettre que l'évapotranspiration potentielle instantanée et la teneur en gaz carbonique étaient maintenues relativement constantes ; la régulation stomatique intervient alors de la même façon sur tous les échanges gazeux. Dans les conditions naturelles, ce parallélisme peut aussi exister (fig. 55) quand les conditions hydriques sont très

favorables ou quand la plante est spécialement bien adaptée, ce qui semble être le cas de *Phragmites communis* ; ce sont peut-être des plantes de ce type qui devraient être choisies pour les mesures de l'évapotranspiration potentielle en zone aride ou semi-aride : adaptées aux sols marécageux, elles craignent peu l'asphyxie du système radiculaire par excès d'eau et présentent de plus un indice foliaire élevé. ROBELIN (1961) a récemment mis en évidence une corrélation systématique entre la production de matière sèche et la consommation en eau, tout au moins pour des valeurs pas trop élevées de l'évapotranspiration potentielle.

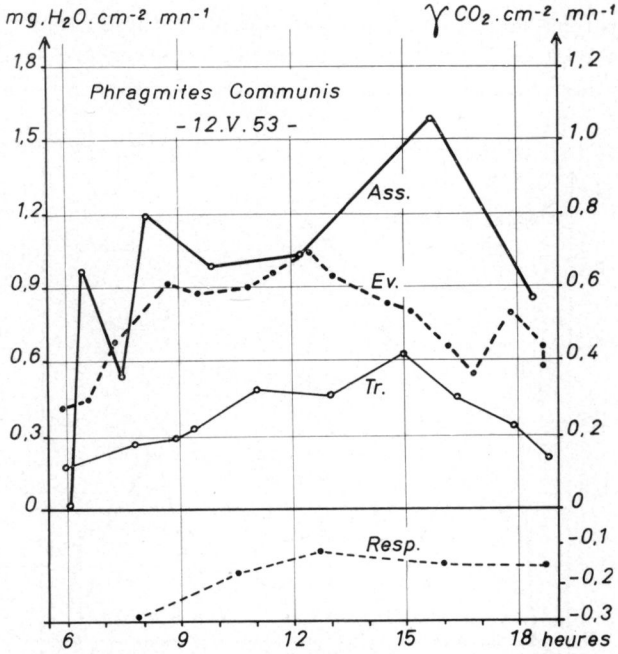


FIG. 55. — *Évolution journalière de la transpiration (Tr), de l'évaporation (Év), de l'assimilation nette (Ass.) et de la respiration à l'obscurité (Resp.) de* Phragmites communis *dans une steppe couverte de roseaux d'une oasis salée (Béni Ounif)* (adapté d'après STOCKER, 1954)

542. — *Efficience de la transpiration*

Depuis longtemps de nombreux chercheurs ont pensé que ce parallélisme entre la photosynthèse et la transpiration pourrait être utilisé en vue de fournir des indices variétaux d'adaptation à la sècheresse.

5421. — *Définition.*

(1956) ASLYNG rappelle que le *cœfficient transpiratoire* ou *efficience de la transpiration* est la quantité d'eau consommée par unité de poids de matière sèche produite ; nous avons vu dans le premier chapitre que l'efficience de la transpiration pouvait s'exprimer par la formule (5) :

$$\frac{\text{Ass}}{\text{T}} = \text{C}\cdot\Phi(\text{Rg})\,\frac{\varepsilon_\varphi + \dfrac{\text{K}\beta}{\text{LDF}'(\theta)}}{\dfrac{\text{R}_n.\Gamma(l)}{u^{0,5}} + \Delta f\,\dfrac{\text{K}\beta}{\text{F}'(\theta)}}\,\Delta p. \qquad (5)$$

Comme nous le montre cette formule, le coefficient transpiratoire dépend non seulement de la variété ou même de l'espèce étudiée, mais encore des conditions du milieu.

5422. — *Variations de l'efficience de la transpiration.*

Le parallélisme entre la transpiration et la photosynthèse cité plus haut est assez exceptionnel. En règle générale, la dépression de midi est beaucoup plus importante pour la photosynthèse que pour la transpiration (fig. 56) ; l'efficience de la transpiration varie au cours de la journée (Moss et *al.* 1961). Par contre il est facile de voir sur les figures 55 et 56 que la photosynthèse évolue parallèlement à la transpiration relative T/E ; cette concordance serait encore meilleure avec ε_φ qui représente l'ouverture des stomates (cf. § 541).

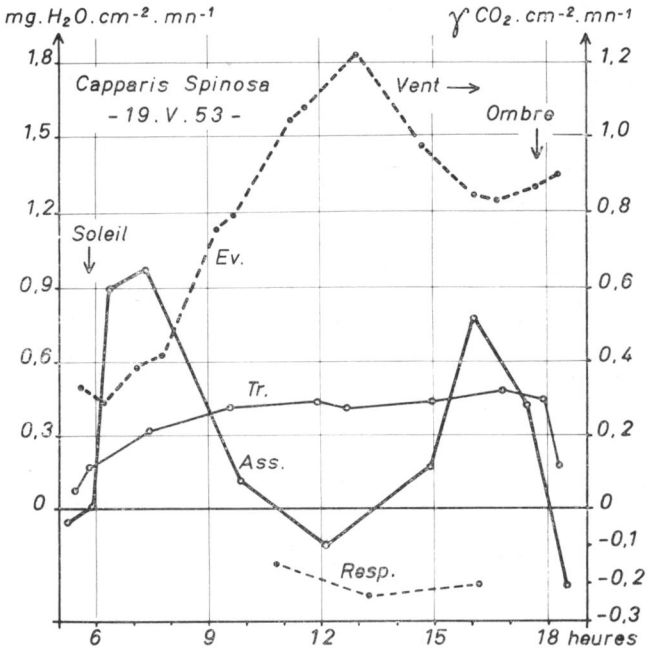


FIG. 56. — Capparis spinosa. *Désert de pierre près de Béni-Ounif. Pour les explications, voir la figure* 55 (adapté d'après STOCKER, 1954)

En dehors de cette action directe due à la régulation stomatique, d'autres facteurs limitants, indépendants de l'évapotranspiration potentielle instantanée, peuvent être responsables de la dépression de la photosynthèse au milieu de la journée. La saturation des feuilles en glucides ou l'inactivation de la chlorophylle par un rayonnement intense peuvent expliquer ce phénomène (RABINOVITCH, 1945). L'excès de température, mais surtout la diminution de la teneur en gaz carbonique (cf. § 532) peuvent constituer d'autres causes de cette dépression accentuée ; en zone désertique notamment (fig. 56), l'émission de gaz carbonique par le sol sec et dépourvu de matière organique doit être très faible, sinon nulle, en dehors des périmètres oasiens où le sol est maintenu humide (cas des *Phragmites*, fig. 55).

Le coefficient transpiratoire varie non seulement à l'échelle journalière, mais encore à l'échelle de l'ensemble de la période végétative. MAXIMOV (1929) rapporte un grand nombre de résultats obtenus dans des conditions plus ou moins artificielles (SHANTZ et PIEMEISEL 1927) ou dans les conditions naturelles (TULAÏKOV 1922). Ces derniers, spécialement intéressants, mettent bien en évidence les fluctuations dues aux facteurs climatiques : ces fluctuations sont aussi importantes, sinon plus, que les fluctuations variétales (tabl. 13 et 14). Comme permet de le prévoir la formule

TABLEAU 13

Fluctuations de l'efficience de la transpiration durant 7 années à la Station expérimentale de Besenchuk (d'après TULAÏKOV, 1922)

Année	Type de temps	Blé Beloturka	Blé Poltavaka	Avoine géante	Orge de Moravie	Millet rouge	Maïs	Moyenne annuelle
1910	Sec	576	628	655	618	443	437	559
1912		476	444	549	449	301	—	445
1913	Humide	316	339	347	280	256	146	281
1914		397	388	370	413	228	195	332
1915	Humide	302	316	293	288	198	160	260
1916		314	323	309	292	162	144	308
1917	Sec	464	467	478	337	280	350	396
Moyenne variétale..		406	415	430	382	266	240	

TABLEAU 14

Efficience de la transpiration dans diverses stations expérimentales russes en 1917 (d'après TULAÏKOV, 1922)

Plantes	Stations					Moyenne variétale
	Kostychev	Besenchuk	Saratov 52° Lat. N	Sumy	Leningrad 60° Lat. N	
Blé variété Beloturka	469	464	349	346	237	373
Avoine	523	478	414	391	292	420
Orge	508	337	374	—	302	380
Millet	244	280	219	175	151	214
Moyenne par station	436	390	339	304	245	

(5), les années sèches (évapotranspiration potentielle élevée, par exemple Δf grand), la consommation d'eau par unité de matière sèche formée est beaucoup plus grande ; elle varie du simple au double d'une année sèche (1911) à une année humide (1913) et aussi d'une région à l'autre selon le climat des stations (tabl. 14). L'efficience de l'eau croît avec la latitude (tabl. 14) car les évapotranspirations potentielles instantanées ont tendance à diminuer : le rayonnement net instantané est plus faible, les jours sont plus longs, la température est plus basse, le déficit de saturation est plus faible,

les stomates restent ouverts et l'assimilation chlorophyllienne est plus intense. Cette remarque permet d'expliquer d'une façon tout à fait satisfaisante les résultats de STANHILL (1960) (cf. BOUCHET 1963).

Le coefficient transpiratoire dépend de l'humidité atmosphérique (Δf) (BRIGGS et SHANTZ 1913). La température (θ) peut l'accroître ou le diminuer selon les espèces. Les plantes de type « climat froid » (blé, orge, avoine, seigle, luzerne) doublent leur coefficient transpiratoire lorsque la température passe de 10-13°C à 27°C (tabl. 15) ; par contre, pour les plantes de type « climat chaud », ce coefficient diminue : s'il varie assez peu pour le maïs et le millet (20 et 60 p. 100), il peut être divisé par quatre ou cinq pour le riz et le sorgho lorsque la température passe de 10-13°C à 27°C ; les autres facteurs climatiques étant maintenus aussi constants que possible. Ces résultats sont à considérer avec prudence car les auteurs, dans leurs expériences n'ont pas tenu compte des modifications du complexe chaleur-lumière (cf. § 512).

TABLEAU 15

L'influence des différences de température de l'air sur l'efficience de la transpiration
(d'après BRIGGS et SHANTZ, 1913)

Plantes	Serre froide 10-13°C	Serre chaude 27°C	Rapport froid-chaud
a) *Plantes de climat froid*			
Blé var. Kubanka.....	385	826	0,47
Orge var. Hannchen	298	758	0,39
Seigle de printemps	423	875	0,48
Avoine var. Burt	403	760	0,53
Luzerne var. Grimm	429	906	0,47
b) *Plantes de climat chaud*			
Maïs var. Dent	249	210	1,19
Millet var. Kursk	429	267	1,61
Riz var. Honduras	2 566	585	4,39
Sorgho var. Red Amber ...	1 236	223	5,54

De simples brise-vent peuvent modifier d'une façon considérable l'efficience de l'eau consommée par suite d'une diminution de l'évapotranspiration potentielle instantanée : dans une expérience rapportée par ailleurs (BOUCHET et de PARCEVAUX 1962, 1963), cette efficience, calculée à partir du rendement en grains, était de 605 pour les parcelles témoin et de 470 pour les parcelles protégées par des brise-vent ; l'irrigation apportée en complément l'a abaissé à 450, grâce à une amélioration de l'alimentation en eau par le sol.

Dans le cas des irrigations par aspersion, la fréquence joue un grand rôle : PETINOV (1961) a ainsi obtenu 10 t de feuillage à l'hectare pour des thés arrosés toutes les quinze minutes pendant deux minutes, contre 7 pour ceux arrosés avec la même quantité d'eau, mais deux fois par jour le matin et le soir ; les témoins non arrosés avaient donné, 1,8 t de feuillage. Grâce à ce régime, les feuilles étaient constamment mouillées, la transpiration était remplacée par une évaporation directe, le débit d'eau à travers les plantes était minime, les stomates ouverts ont

permis une production de matière sèche accrue. L'irrigation par aspersion en plein soleil durant les heures les plus chaudes de la journée, ne présente généralement que des avantages ; nous avons pu constater que le blé, le colza, la betterave, le maïs, soumis à des températures sous abri supérieures à 30°C à Versailles, n'ont subi aucun dommage apparent, bien au contraire. Il se peut que certaines espèces soient sensibles à de tels traitements.

Il est donc impossible de considérer le coefficient transpiratoire comme un indice variétal ou même comme un indice d'adaptation à la sécheresse ; il y a des différences d'une culture à l'autre selon l'année et le climat. L'interprétation de ces fluctuations est souvent difficile et l'on comprend fort bien que MITSCHERLICH et BEUTELSPACHER (1938) d'après le tableau 16, aient pu simplement conclure que la consommation en eau est indépendante de la production ; globalement, cette conclusion est exacte. PENMAN (1956) estime également à juste titre, qu'il n'y a aucune raison de penser qu'une plante doive transpirer une quantité d'eau déterminée pour produire une quantité donnée de matière sèche : le taux de transpiration comme le taux de croissance dépend du climat et du temps.

TABLEAU 16

Consommation en eau et production de matière sèche récoltée
(d'après MITSCHERLICH et BEUTELSPACHER, 1938)

Avoines		Pommes de terre	
Eau en mm	Production en q/ha	Eau en mm	Production en q/ha
240	25,6	303	37,3
220	31,2	326	52,3
242	33,0	316	56,1
265	39,8	312	78,1
238	46,4		
239	52,8		

5423. — *Intérêt de l'étude de l'efficience de la transpiration.*

L'intérêt de la notion d'efficience de la transpiration réside dans la possibilité d'une analyse systématique des causes de fluctuations pour connaître finalement les conditions optimales de production d'un maximum de matière sèche avec un minimum d'eau. La formule (5) aide à progresser dans cette voie, mais il ne s'agit que d'une hypothèse de travail et on pourrait probablement utiliser d'autres formulations.

543. — *Efficience stomatique*

Les difficultés d'interprétation de l'efficience de la transpiration nous ont amené à chercher à grouper au maximum l'action des facteurs climatiques dans un seul terme. Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'il était possible de représenter les réactions biologiques des plantes aux facteurs hydriques du climat par la transpiration relative (T/E) ou mieux la transpiration relative corrigée (ε_φ).

L'étude de ces notions conduit logiquement à la formule :

$$\frac{\text{Ass}}{\varepsilon_\varphi} = \frac{C \cdot \Phi(\text{Rg}) \cdot \Delta p \,.\, u^{0,5}}{\Gamma(l)} \tag{6}$$

exprimant l'« efficience stomatique » : les facteurs climatiques dont dépend la photosynthèse sont bien séparés et l'analyse des phénomènes devrait donc en être facilitée.

Malgré leurs imperfections, les résultats de STOCKER (1954) présentés plus haut (fig. 55 et 56) sont suffisamment précis et complets pour permettre de tenter une interprétation à partir de cette nouvelle hypothèse. La figure 57 *a* présente pour ces plantes et quelques autres les relations existant entre l'assimilation chlorophyllienne et la transpiration ; toutes les corrélations sont nulles ou négatives à l'exception de *Phragmites*. Il s'agit de plantes désertiques à assimilation faible ; les corrélations négatives, pour *Anabasis* et *Zilla* notamment peuvent peut-être s'expliquer par la faible teneur de l'air en gaz carbonique. Les variations de l'efficience de la transpiration représentée par le rapport Ass/T sont difficiles à interpréter dans ce cas ; sauf pour *Phragmites*, ce rapport est loin d'être constant pour chaque espèce.

La liaison existant entre l'assimilation chlorophyllienne et la transpiration relative (T/E) est présentée figure 57 *b*. Faute des éléments de calcul indispensables,

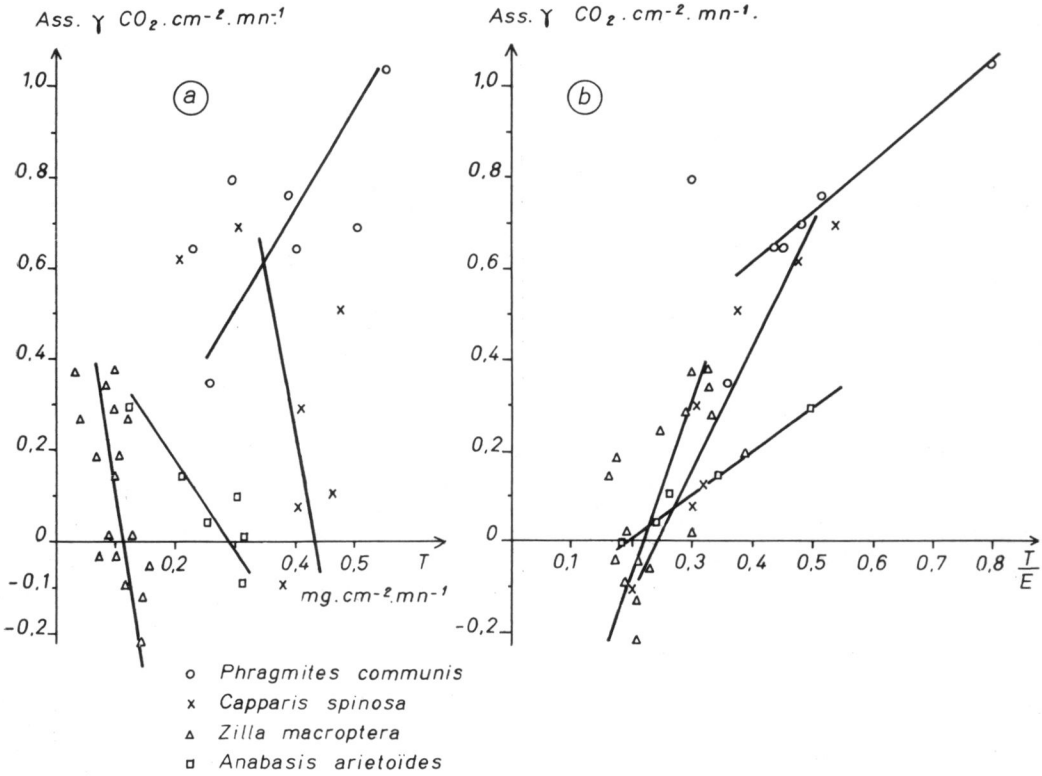


FIG. 57 *a*. — *Relation entre l'assimilation et la transpiration* de Phragmites communis, Capparis spinosa, Zilla macroptera *et* Anabasis arietoïdes *à Beni-Ounif* (*Sahara*)
FIG. 57 *b*. — *Relation entre l'assimilation et la transpiration. relative pour les mêmes plantes*
(établies d'après les données de STOCKER, 1954)

il n'a pas été possible d'utiliser la transpiration relative corrigée (ε_φ) ; les résultats seraient probablement meilleurs mais pas essentiellement différents, car ε_φ varie comme T/E (fig. 37) ; en particulier, le signe des corrélations resterait le même. Ces dernières sont toutes positives et le groupement des points est beaucoup plus satisfaisant que dans la représentation précédente. La photosynthèse croît avec la transpiration relative. Les conditions climatiques du milieu sont d'autant plus favorables que la transpiration relative ou sa valeur corrigée est plus proche de l'unité. L'intérêt de cette grandeur synthétique se confirme donc : elle traduit bien la réaction biologique des plantes au milieu et constitue une sorte d'indice ponctuel et instantané qui permet en quelque sorte de diagnostiquer l'état physiologique des végétaux.

Par ailleurs, l'analyse systématique de l'efficience stomatique devrait faciliter l'étude de l'action de la teneur en gaz carbonique, de la lumière et des autres facteurs dont dépend la production de matière sèche.

Bien entendu, d'autres exemples seraient nécessaires pour démontrer sans équivoque le bien fondé des raisonnements que nous avons été amené à développer, car les données utilisées concernent des plantes un peu spéciales sous un climat exceptionnel ; les valeurs d'assimilation sont d'ailleurs faibles comparativement à celles obtenues pour des plantes cultivées sous des climats plus cléments. Mais les résultats sont suffisamment encourageants pour justifier de nouvelles recherches dans ce domaine.

Il ressort de cette étude de l'influence des facteurs du milieu sur la production de matière sèche que l'analyse en est très délicate, par suite de l'instabilité des conditions climatiques et des interactions complexes des facteurs entre eux. C'est pourquoi il est nécessaire d'aborder ce domaine de recherches plus dans un esprit de synthèse que d'analyse.

CONCLUSIONS

La production végétale est sous la dépendance étroite des conditions du milieu climatique. Le grand nombre de facteurs intervenant à chaque instant et la complexité de leurs interactions ne facilite guère l'étude de ces phénomènes.

Pour aborder ce problème, nous nous sommes placé au niveau de la feuille prise dans son contexte naturel, au milieu de la communauté végétale dont elle fait partie. A une échelle aussi fine, les facteurs dont dépend l'assimilation chlorophyllienne varient constamment dans le temps et l'espace. La quantité de matière sèche produite par unité de temps sera à chaque instant limitée par l'un d'entre eux ; ce sera tantôt la lumière, tantôt la température, tantôt le gaz carbonique ou l'eau.

Au double point de vue scientifique et agronomique, il est intéressant et utile de connaître l'importance relative de chacun de ces facteurs limitants. Mais, comme nous l'avons vu, l'étude expérimentale de ces phénomènes est délicate : les mesures dans une culture de plein champ doivent être faites avec de multiples précautions et leurs résultats interprétés avec prudence : un seul facteur limitant suffit à masquer l'action de tous les autres et son oubli peut conduire à des interprétations contradictoires.

Le facteur eau, pris dans son sens le plus large, est sans doute, dans l'état actuel des techniques agronomiques, le facteur dont l'influence est très souvent prépondérante. Son importance vient des multiples aspects sous lesquels il intervient dans les processus liés à la production de matière sèche.

Après avoir localisé les principales résistances au passage de l'eau dans la plante au niveau de la feuille, c'est-à-dire dans la couche laminaire limite quand les stomates sont ouverts et dans ces derniers et la cuticule lorsqu'ils sont fermés, nous avons vu l'intérêt du maintien de l'équilibre de l'alimentation hydrique des végétaux. Si le sol et la plante sont susceptibles, sans perturbation de l'état hydrique au niveau des organes assimilateurs, d'assurer le débit défini par l'évapotranspiration potentielle instantanée, le facteur eau n'est pas limitant. D'après nos études, il semble que cette éventualité soit rarement réalisée ; même dans les régions subhumides comme le Bassin parisien, les plantes cultivées dans les meilleures conditions peuvent subir un déséquilibre hydrique quotidien. L'eau contenue dans le sol, mais surtout l'évapotranspiration potentielle instantanée peuvent constituer des facteurs limitants de la production. Ces facteurs limitants permettent d'expliquer en grande partie, les larges variations de rendement dues aux facteurs climatiques ou même microclimatiques et que l'on observe d'une année à l'autre ou d'une région à une autre.

Le facteur eau est donc prépondérant ; cette conclusion est confirmée par l'expérience relatée par ailleurs (cf. article de BOUCHET et de PARCEVAUX : amélioration des rendements des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle). Cette expérience ouvre certaines perspectives : il est possible d'agir dans un sens favorable au maintien de l'équilibre hydrique des végétaux, en agissant sur l'alimentation en eau par le sol grâce aux irrigations, en réduisant l'évapotranspiration potentielle ou en associant ces deux méthodes.

Les brise-vent réduisent la vitesse du vent donc aussi l'évapotranspiration potentielle (GUYOT 1963) ; l'action reste efficace malgré un effet défavorable sur les échanges de gaz carbonique. Les cultures associées peuvent contribuer à améliorer cet équilibre entre l'offre et la demande en eau (BALDY 1963). Les irrigations et tout ce qui améliore l'absorption de l'eau par les racines (nutrition minérale, aération du sol, etc.) sont favorables ; la concentration des irrigations sur de grandes surfaces, de façon à modifier le climat par augmentation de l'humidité de l'air, paraît souhaitable. De même, l'irrigation par aspersion est préférable, surtout si elle est appliquée en plein jour et durant les heures les plus chaudes ; la plupart des végétaux n'y trouvent que des avantages : les stomates des feuilles maintenues mouillées restent généralement ouverts (PETINOV 1961).

Dans la mesure où le facteur limitant eau sera maîtrisé, d'autres facteurs tels que la lumière, le gaz carbonique... deviendront à leur tour prépondérants. S'il est difficile d'augmenter l'intensité lumineuse, il est peut-être possible d'améliorer, par voie génétique, le port du feuillage de façon à absorber la lumière d'une façon plus efficace (NICHIPOROVICH 1962) ; les cultures associées, convenablement choisies, peuvent également aboutir à un résultat favorable dans ce sens (BALDY 1963). Quant au gaz carbonique, les expériences encore peu nombreuses en dehors des serres, ne permettent pas, pour l'instant, de tirer des conclusions certaines à l'échelle agronomique, mais c'est un problème qui mérite l'attention des chercheurs ; une augmentation de la teneur en gaz carbonique peut provoquer un accroissement de l'efficience de l'eau.

Enfin, il résulte de ces considérations que des progrès importants sont encore possibles en ce qui concerne les rendements et aussi la qualité de la production agricole.

Reçu pour publication en juillet 1963

SUMMARY

TRANSPIRATION OF PLANTS AND PRODUCTION OF DRY MATTER. A STUDY OF INTERPRETATION IN FUNCTION OF FACTORS OF THE ENVIRONMENT

The plants could theoretically utilize 20-25 p. 100 of the solar energy received, but in fact they only utilize about 1 p. 100. There apparently exist limiting factors among which water is probably the most important. The water factor shows two aspects : conditions of the moisture supply on the one hand, and conditions of potential evapotranspiration governed by the climate on the other. The present study deals with the effect of actual evapotranspiration on the physiology of plants, especially on dry-matter production under natural conditions in the field.

The first chapter is devoted to a review of the slate of water in plants and of the dynamics of water in the plant moisture (content, relative turgidity, suction pressure, diffusion pressure deficit, potential, etc.) and to the study of different zones of resistance to the passage of water. When the stomate are open, the main resistance to the passage of water is in the laminary boundary layer. On the basis of these physical and biological facts, new hypotheses propounded by BOUCHET (1963) are discussed, related to the effect of climatic factors on evaporation, transpiration and dry-matter production and serving as a basis for the following chapters (formulae 1, 2, 3, 3', 4, 5 and 6).

The second chapter briefly deals with the effect of the most important climatic factors (net radiation, saturation deficit, wind, etc.) on evaporation or potential evapotranspiration.

The third chapter is devoted to the study of transpiration or actual evapotranspiration : physiological reactions (movements of the stomata) generally limit transpiration to a level inferior to that defined by potential evapotranspiration. These regulating processes are due to the disequilibrium between the entry and exit of water. Different methods of mesuring transpiration are discussed and classified. Disturbances caused by the measurements ought to be kept at a minimum ; those relating to the external medium are the more dangerous. With certain precautions a technique adapted to the « cut twig » method may be used : the transpiration of a leaf is compared with that of a standard evaporating surface kept exactly under similar conditions.

The fourth chapter discusses a synthetic representation of transpiration processes : the ratio T/E (or relative transpiration) is obtained by the method described in the previous chapter. Experimental conditions for measuring relative transpiration are discussed and described. It is shown that regulation by the stomata regularly occurs even in sub-humid regions.

Finally, in the fifth chapter a study is made of the effect of some climatic factors on dry-matter production. The carbon dioxide contents seem to have an important though little understood effect under natural conditions. The assimilation of chlorophyll is more or less directly related to the potential evapotranspiration by the intermediary of stomatal regulation. Consequently, there is scope for studying the relationships between photosynthesis and transpiration or opening of the stomata. Concepts of the efficiency of transpiration and efficiency of stomata are discussed ; these concepts do not provide constant for varieties nor indices to drought tolerance, but depend on climatic conditions. By modifying the climate, it is possible to improve the utilization of water.

The production of dry matter depends on climatic factors which constantly vary with time and space. The variable conditions to which crops growing in the field are exposed differ greatly from the relatively constant artificial conditions to which isolated plants are subjected in the laboratory. Experiments under natural conditions are thus indispensable, permitting a study of the climatic complex and yielding empirical laws. The often limiting water-factor may be modified by irrigation, windbreaks, etc., and dry-matter production and yields may thus be increased by decreasing the consumption of water.

ZUSAMMENFASSUNG

PFLANZLICHE TRANSPIRATION UND ERZEUGUNG VON TROCKENMASSE. VERSUCH EINER DEUTUNG DURCH DIE UMWELTFAKTOREN

Theoretisch könnten die Pflanzen 20-25 p. 100 der erhaltenen Sonnenenergie benützen ; in Wirklichkeit sind es jedoch nur 1 p. 100. Es gibt also begrenzende Faktoren, deren der wichtigste sehr warscheinlich das Wasser ist : einerseits die Wasserzufuhr durch den Boden und andererseits die durch das Klima bestimmten potentiellen Evapotranspirationsbedingungen. Unsere Studie ist

auf den Einfluss der sofortigen Evapotranspiration auf die Pflanzenphysiologie und insbesondere auf die Erzeugung der Trockenmasse unter natürlichen Bedingungen gerichtet.

Das erste Kapitel bringt den Zustand des Wassers in der Pflanze und die Dynamik des Wassers durch die Pflanze hindurch (Wassergehalt, relativer Turgor, Saugkraft, Druckdefizit der Diffusion usw..) in Erinnerung. Es werden die verschiedenen Widerstandszonen gegen ein Durchdringen des Wassers untersucht. Sind die Spaltöffnungen geweitet, so liegt der hauptsächlichste Widerstand in den laminären Grenzschichten. Diese physischen und biologischen Reminiszenzen gestatten neue, BOUCHET (1963) entnommene Annahmen einzufügen. Sie betreffen die Wirkung der klimatischen Faktoren auf die Evaporation, die Transpiration und die Erzeugung von Trockenmasse und dienen als Unterlage für die nächsten Kapitel. (Formeln 1, 2, 3, 3', 4, 5 und 6.)

Das zweite Kapitel beträgt eine kurze Studie über Einfluss der wichtigsten klimatischen Bestandteile (Nettostrahlung, Sättigungsdefizit, Wind...) auf die Evaporation und die potentielle pünktliche Evapotranspiration.

Das dritte Kapitel ist dem Studium der Transpiration und der wirklichen pünktlichen Evapotranspiration gewidmet : physiologische Reaktionen (Spaltöffnungsbewegungen) begrenzen gewöhnlich die Transpiration auf einer Stufe, die niedriger als diejenige der pünktlichen potentiellen Evapotranspiration liegt. Diese Regulierungserscheinungen werden durch Gleichgewichtsstörungen zwischen Wasserein-und austritt hervorgerufen. Es werden verschiedene Methoden zur Messung der Transpiration zur Diskussion und Klassifizierung vorgeschlagen. Die durch Messung hervorgerufenen Störungen sollten auf ein Mindestmass beschränkt bleiben ; am gefährlichsten sind diejenigen, die das äussere Milieu betreffen. Mit einiger Vorsicht kann man die Methode des sogen.« abgeschnittenenAstes » anwenden : die Transpiration eines Blattes vergleicht man mit der Evapotranspiration einer Standardoberfläche, die sich genau in denselben Bedingungen befindet.

Das vierte Kapitel ist der Diskussion einer synthetischen Darstellung der Transpirationserscheinungen gewidmet : das Verhältnis T/E (oder relative Transpiration) erhält man durch die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Methode. Es werden auch die Experimentierbedingungen der Messung der relativen Transpiration diskutiert und näher bestimmt. Es ergibt sich, dass die Spaltöffungsregulierung die Regel ist, selbst in subhumiden Zonen.

Das fünfte Kapitel betrifft das Studium des Einflusses einiger klimatischer Faktoren auf die Trockenmasseerzeugung. Der Gehalt an Kohlendioxyd scheint einen wichtigen, aber unter natürlichen Bedingungen wenig bekannten Einfluss auszuüben. Die Chlorophyll-Assimilation ist mehr oder wenig an die sofortige pünktliche potentielle Evapotranspiration gebunden, mittels Spaltöffnungsregulierung. Es ist also interessant, die Beziehungen zwischen Photosynthese und Transpiration oder Spaltöffnungen zu untersuchen. Somit werden die Begriffe Effizienz der Transpiration und Effizienz der Spaltöffnung eingeführt, Begriffe die weder sortenbedingte konstante Grössen, noch Anpassungsindexe an die Trockenheit sind : sie hängen nur von den klimatischen Bedingungen ab. Indem man das Klima ändert, ist es möglich, die Produktivität des verbrauchten Wassers zu verbessern.

Die Trockenmasseerzeugung hängt von den klimatischen Faktoren ab ; letztere ändern sich ständig, zeitlich und räumlich. Die labilen Bedingungen denen die Feldkulturen unterworfen sind, unterscheiden sich sehr von den künstlichen, relativ konstanten Bedingungen, denen eine Einzelpflanze im Labor unterworfen ist. Das Experimentieren unter natürlichen Bedingungen ist also unerlässlich, und führt zur Analyse des Klimakomplexes mit experimentellen Gesetzen als Endregebnis. Durch Windschutz, Bewässerung ist es möglich, auf den Faktor Wasser, der oft begrenzend wirkt, einzuwirken, Die Erzeugung der Trockenmasse, folglich des Ertrags, kann auf diese Art erhöht werden, bei gleichzeitiger Herabsetzung des Wasserverbrauchs.

РЕЗЮМЕ

Транспирация растений и продукция сухой массы. Опыт интерпретирования в зависимости от условий среды.

ДЕ ПАРСЕВО.

Теоритически, растение должно было-бы использовать от 20 до 25 % получаемой солнечной энергии; на практике — оно удовлетворяется приблизительно 1 %. Существуют следовательно ограничивающие фак-

торы, наиболее важным из коих является влага. Фактор этот представляется под двумя разными видами : с одной стороны — питания почвы влагой, и с другой — условиями потенциальной эвапотранспирации зависящей от климата. В данной статье разсматривается влияние мгновенной потенциальной эвапотранспирации на физиологию растений, и в частности, на продукцию сухой массы в натуральных полевых условиях.

В первой главе автор напоминает о различных состояниях влаги в растении и об ее динамике (количество влаги в растении, относительная набухлость, сила всасывания, дефицит давления потенциальной диффузии и т. д.) и изучает различные зоны противодействия поступлению влаги. Когда устьица открыты, главный центр противодействия находится в ограничивающем пластинчатом слое. Эти напоминания позволяют выдвинуть новые гипотезы заимствованные у Бушэ (1963).

Гипотезы эти относятся к действию климатических факторов на испарение и служат канвой для последующих глав (формулы 1, 2, 3, 3′, 4, 5, 6).

Вторая глава заключает краткое исследование наиболее важных климатических факторов (чистое излучение, дефицит насыщенности, ветер и т. д.) на испарение, иначе говоря, пунктуальной потенциальной эвапотранспирации.

Третья глава посвящена изучению транспирации, или реальной пунктуальной эва потранспирации : физиологические реакции (движения устьиц) обыкновенно ограничивают транспирацию на уровне менее высоком чем уровень определяемый при помощи реальной пунктуальной эвапотранспирации. Эти явления регуляции вызваны отсутствием равновесия между приходом и расходом влаги. В главе этой обсуждаются и классируются разные методы измерения транспирации. Беспо рядки вызванные этими измерениями должны быть сведены до минимума. Приняв некоторые меры предосторожности можно с успехом применить усовершенствован ный метод ведущий начало от, так называемого, метода « срезанной ветки », при котором транспирация листа сравнивается с испарением стандартной испарительной поверхности, поставленной в абсолютно такие-же условия.

В четвертой главе обсуждается синтетическое изображение явлений транспирации : соотношение TE (относительная транспирация), может быть получено при помощи метода описанного в пред′идущей главе. Четвертая глава уточняет также условия опыта измерений этой относительной танспирации. Изо всего вышесказанного вытекает что регуляция устьиц является законом, даже в субвлажных зонах.

И наконец в пятой главе изучается влияние некоторых климатических факторов на продукцию сухой массы. В природных условиях содержание углекислоты играет как-будто какую-то плохо выясненную роль. Ассимиляция хлорофилла более или менее прямо связана с мгновенной потенциальной пунктуальной транспирацией через регуляцию устьиц. Представляет, следовательно, интерес изучить связь между фотосинтезом и транспирацией, или моментом открытия устьиц. Для этого автор прибегает к условным понятиям эффективности транспирации и эффективности устьиц. Понятия эти не являются ни сортовыми константами, ни указателями применения растения к засушливости; они зависят от климатических условий. Можно следовательно увеличить продуктивность влаги при помощи влияния на климат.

Выработка сухой массы зависит от климатических факторов; факторы эти подвергаются постоянным изменениям во времени и пространстве. Непостоянные внешние условия полевых культур сильно отличаются

от искуственных условий в которых растение изучается в лаборатории. Опыты в природных условиях, следовательно, необходимы; они приводят к изучению климатических комплексов и благодаря им можно выводить экспериментальные законы. На фактор — влагу, который часто является ограничивающим, можно воздействовать при помощи ирригаций, ветроломных полос и т. д.; продукция сухой массы, а следовательно и урожайность можно увеличить пропорционально уменьшению количества потребленной влаги.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(Les références les plus importantes sont précédées d'un astérisque *)

ABD EL RAHMAN A. A., et *al.*, 1959. Preliminary observations on the effect of light intensity and photoperiod on transpiration and growth of young tomato plants under controlled conditions. *Meded. Landbouwhogesch. Wageningen*, **59**, 11, 112.

ANGOT A., 1928. *Traité élémentaire de météorologie*, 420 p. GAUTHIER-VILLARS, Paris.

ARLAND A., 1959. Transpiration test. (All.-ang.) *Hodowla Rosl. Aklim. Nasienn.*, **3**, 569-595.

ASLYNG H. C., 1956. Water consumption in plant production. In RUHLAND W. *Encyclopedia of plant physiology*, **3**, 685-695, Springer Verlag. Berlin.

BALDY Ch., 1963. Cultures associées et productivité de l'eau. *Ann. agron.* **14**, 4, 499-544.

*BANGE G. G. J., 1953. On the quantitative explanation of stomatal transpiration. *Act. Bot. Neerland.*, **2**, 255-297.

BASSHAM J. A., CALVIN M., 1959. *Le cycle du carbone dans la photosynthèse* 112 p., Dunod, Paris.

BERGER-LANDEFELT U., 1936. Der Wasserhaushalt der Alpenpflanzen. *Bibl. Bot.*, H. 115.

BLACKMAN G. E., BLACK J. N., 1959. Physiological and ecological studies in the analysis of plant environment. XII : the role of the light factor in limiting growth. *Ann. Bot.*, **23**, 19, 131-145.

BOHNING R. H., BURNSIDE C. A., 1956. The effect of light intensity on rate of apparent photosynthesis in leaves of sun and shade plants. *Amer. J. Bot.*, **43**, 557-561.

BONNER J., 1962. The upper limit of crop yield. *Science*, **137**, 3523, 11-15.

BONNER J., GALSTON A. W., 1952. *Principles of plant physiology*, 500 p. Freeman and Co., San Francisco.

BOSIAN G., ENSGRABER A., 1955. Über die Vollautomatisierung der CO_2. Assimilationsbestimmung und zur Methodik des Küvettenklimas. *Planta*, **45**, 470-492.
UNESCO.

BOUCHET R. J., 1962. L'évapotranspiration potentielle. Sa mesure ou son estimation à partir de l'évaporation sous abri. Signification et intérêt écologique. *Recherches sur la zone aride*. Coll. de Montpellier (sous-presse),

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration potentielle, Évapotranspiration réelle et production de matière sèche. *Ann. agron.* **14**, 5.

BOUCHET R. J., PARCEVAUX S. de, 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'évapotranspiration potentielle au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, **48**, 686-694.

BOUCHET R. J., RIOU Ch., 1960. Essai d'interprétation de la variation de la « constante psychrométrique ». *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 4419-4421.

BOYSEN JENSEN P., MÜLLER D., 1929. Über die Kohlensäureassimilation bei Marchantia und Peltigera. *Jb. wiss. Bot.*, **70**, 503-511.

BRIGGS L. J., SHANTZ H. L., 1913. The water requirement of plants. *U. S. Dept. Agric. Bur. Ind. Bull.*, 284, 1-48.

BRILLIANT A. W., 1924. La teneur en eau dans les feuilles et l'énergie assimilatrice. *C. R. Ac. Sci.*, **178**, 2122-2124.

BRIX H., 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato and loblolly pine seedlings. *Physiol. Plant.*, **15**, 1, 10-20.

CARTELLIERI E., 1940. Uber Transpiration und Kohlensäureassimilation an einen hochalpinen Standort. *S. B. Akad. Wiss. Wien*, **149**, 95.

CATSKY I., SLAVIK B., 1960. Dispositif pour la mesure de l'intensité de la photosynthèse (en russe). *Biol. Plant. Tchec.*, **2**, 2, 107-112.

COSTES C., 1960. Absorption et utilisation de l'énergie lumineuse par les végétaux cultivés dans les conditions naturelles. *Ann. Physiol. veg.*, **2**, 175-229.

DURAND R., 1960. Mesure et signification de l'éclairement en Physiologie végétale. *Ann. Physiol. Vég.*, **2**, 109-118.

ECKARDT F. E., 1960. Ecophysiological mesuring techniques applied to research on water relations in plants in arid and semi-arid regions. *Recherches sur la zone aride*, **15**, 139-165, UNESCO.

EDLEFSEN N. E., 1941. Some thermodynamics aspects of the use of the soil moisture by plants. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **22**, 917-940.

EDMOND J. B., MUSSER A. M., ANDREWS F. S., 1953. *Fundamentals of horticulture*. Blakeston Comp. Inc., New York Toronto, 310 p.

ELKINS C. B., WILLIAMS G. G., 1962. Still and time-lapse photography of plant stomata. *Crop. Sci.*, **2**, 2, 164-166.

ERMOLAEVA E. J., 1959. Relation entre la photosynthèse des plantes cultivées et la concentration du CO_2 (en russe). *Eksper. Bot. SSSR.*, **4**, 13, 46-63.

EVENARI M., 1938. The physiological anatomy of the transpiratory organs and the conducting systems of certains plants typical of the wilderness of Judaca. *Linnean Soc. J. Bot.*, **28**, 389.

EVENARI M., 1962. Physiologie végétale et recherches sur la zone aride. *Recherches sur la zone aride*, **18**, 191-213, UNESCO.

FERRI M. G., 1954. Water balance of the « Caatinga », a semi-arid type of vegetation of northern Brazil. *VIIIe Congrès intern. Bot.*, Paris, 221-223.

FERRI M. G., 1960. Contribution to the knowledge of the ecology of the « Rio Negro Caatinga ». *Bull. Res. Counc. of Israel*, **8**D, 3-4, 195-208.

FERRI M. G., LABOURIAU L. G., 1952. Water balance of plants from the « Caatinga » I. Transpiration of some of the most frequent species of the « Caatinga » of Paulo Afonso (Bahia) in the rainy season. *Rev. Brasil. Biol.*, **21**, 301, 312.

FERRI M. G., LAMBERTI A., 1960. Informaçoes sôbre a economia d'âgua de plantas de um Tabuleiro no municipio de gorona (Pernambuco). *Bol. Fac. Fil. Cienc. et Letr. Univ. São Paulo*, 247, *Botanica*, **17**, 133-145.

FERRY J. F., WARD H. S., 1959. *Fundamentals of plant physiology*, 288 p. Macmillan, New York.

FIRBAS F., 1931. Untersuchungen über den Wasserhaushalt der Hochmoorpflanzen. *Jb. Wiss. Bot.*, **74**, 459.

FOGG G. E., 1958. Actual and potential yields in photosynthetis. *Science*, **14**, 57, 395-400.

FULLER H. J., 1948. Carbon dioxide concentration of the atmosphere above Illinois forest and grass land. *Amer. Midlands Naturalist.*, **39**, 247-249.

GAASTRA P., 1959. Photosynthetis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogesch. Wageningen*, **59**, 13, 1-68.

GÄUMANN E., JAAG G., 1937. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Reaktionsgeschwindigkeit des Spaltöffnungen. *Ber. dtsch. Bot. Ges.*, **55**, 236-252.

GESLIN H., 1944. *Étude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat. Contribution à l'étude du climat du blé*. Thèse 116 p. Imprimerie nationale, Paris.

GESLIN H., 1952. Le climat. In : *Nouveau Larousse agricole*. Annexe, 1-34, Larousse, Paris.

GESSNER F., 1938. Die Beziehung zwischen Lichtintensität und Assimilation bei submersen Wasserpflanzen. *Jb. wiss. Bot.*, **86**, 491-526.

GRADMANN H., 1928. Untersuchungen über die Wasserverhältnisse des Bodens als Grundlage des Pflanzenwachstums. *Jb. wiss. Bot.*, **69**, 1-100.

GREGORY F. G., MILTHORPE F. L., PEARSE H. L., SPENCER H. J., 1950. Experimental studies of the factors controlling transpiration. *J. Exp. Bot.*, **1**, 15-28.

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. *Ann. agron.* **14**, 4, 429-498.

HALLAIRE M., 1961. Irrigation et utilisation des réserves naturelles. *Ann. agron.*, **12**, 1, 87-97.

HALLAIRE M., 1962. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de desséchement. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 2047-2049.

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **14**, 4, 393-428.

HARTMANN H. D., 1959. Relation entre la consommation d'eau et le degré d'ouverture des stomates dans les consommations prévalant en serre et en plein air. (All.-fr.) *Congr. Mond. Rech. agron.*, Rome, 713-720.

HEATH O. V. S., 1956. The water relations and mechanisms of stomata. In « *Plant Physiol. A treatise* II », 193-250, Acad. Press, New York.

HENCKEL P. A., STROGONOV B. P., 1961. Physiology of plants consuming saline water. *Recherches sur la zone aride*, **14**, Coll. de Téhéran, 145-151, UNESCO.

HONERT Th. VAN DEN, 1948. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions Faraday Soc.*, **3**, 146-153.

HUBER B., 1928. Zur physik der Spaltöffnungstranspiration I. Das maximale Diffusions vermögen von Porenmembranen II. Die Abhängigkeit der Verdunstungsgrösse vom Porenareal. *Ber. dtsch. Bot. Ges.*, **46**, 610-625.

HUBER B., 1930. Untersuchungen über die Gesetze der Porenverdunstung. *Z. Bot.*, **23**, 839-891.

HUBER B., 1950. Registrierung der CO_2 — Gefälles und Berechung der CO_2 — Stromes über Pflanzengesellschaften mittels Ultrarot-Absorptionschreiber. *Ber. dtsch. bot. Ges.*, **63**, 52-63.

HUBER B., 1952. Über die vertikale Reichweite vegetationsbedingter Tagesschwankungen im CO_2 — Gehalt der Atmosphäre. *Fortswiss. Cbl*, **71**, 372-380.

HUBER B., 1956. Die Evaporation. In RUHLAND W. : *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, **3**, 285-292, Springer-Verlag. Berlin.

HUBER B., 1960. Die CO_2 — Konzentration in Pflanzengesellschaften. In RUHLAND W. *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, **5**, 339-347. Springer-Verlag. Berlin.

HUBER B., POMMER J., 1954. Zur Frage eines jahreszeitlichen Ganges im CO_2-Gehalt der Atmosphäre. *Angew, Bot.*, **28**, 53-62.

INOUE E., 1957. An aerodynamic measurement of photosynthesis over a paddy field. *Proced. 7th. Jap. nation. Cong. Appl. Mech. Tokio Univ. Tokyo Sci. Counc. Jap.*, 211-214.

JACOBS J. M., VAN WINDEN, 1962. La production des laitues en serre en Hollande. *Journées régionales de la laitue*, Rennes, avril 1962. Inst. Nat. Vulg. Fruits, Légumes et Champignons, A. C.T. A. Paris.

KAMP H., 1930. Untersuchungen über Cuticularbau und cuticuläre Transpiration von Blättern. *Jb. wiss. Bot.*, **72**, 403.

KILLIAN Ch., LEMEE G., 1956. Les xérophytes : leur économie d'eau. In RUHLAND W. *Encyclopedia of plant physiology*, **3**, 787-824, Springer-Verlag, Berlin.

KOSTYTSCHEW S., TSCHESNOKOV W., BAZYRINA K., 1930. Untersuchungen über den Tagesverlauf der Photosynthese an der Küste der Eismeeres. *Planta*, **2**, 160.

LEICK E., 1927. Untersuchungen über den Einfluss des Lichtes auf die Öffnungsweite unterseitiger und oberseitiger Stomata derselben Blattes. *Jb. wiss. Bot.*, **67**, 771.

LEMEE G., 1956. Aspect écologique de la régulation stomatique de la transpiration. *Bull. soc. Franç. Physiol.*, **2**, 1, 29-38.

LEMON E. R., 1960. Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. *Agron. J.*, **52**, 12, 697-703.

LIVINGSTON B. E., 1906. The relation of desert plants to soil moisture and to evaporation. *Carnegie Inst. Washington Publ.*, 50, 1-77.

LIVINGSTON B. E., BROWN W. H., 1912. Relation of the daily march of transpiration to variations in the water of foliage leaves. *Bot. Gaz.*, **53**, 309-330.

LUNDEGÅRDH H., 1924. Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur. Gustav Fisher Iena.

MANNING W. M., 1938. Photosynthesis. *J. Physic. Chem.*, **42**, 815-854.

MAXIMOV N. A., 1929. *The plant in relation to water*, 451 p. Yapp. Londres.

MILLER R., RÜSCH J., 1960. Zur Frage der Kohlensäureversorgung des Waldes. *Forstwiss. Zbl.*, **79**.

MILTHORPE F. L., 1959. Transpiration from crop plants. *Field Crop Abstr.*, **12**, 1, 1-9.

MILTHORPE F. L., 1962. Plant factors involved in transpiration. *Recherches sur la zone aride*, **16**, 107-115. Coll. de Madrid, UNESCO.

MITSCHERLICH E. A., BEUTELSPACHER H., 1938. Untersuchungen über den Wasserverbrauch verschiedener Kulturpflanzen und den Wasserhaushalt des natürlich gelagerten Bodens. *Bodenkunde u. Planzenernähr*, 9-10, 337-395.

MONTEITH J. L., SZEICZ G., 1960. The carbon dioxide flux over a field of sugar beet. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 368, 205-214.

MORELLO J., 1953. Transpiracion y balance de agua de la bananera en las condiciones de la Ciudad de São Paulo. *Bol. Fac. Fil. Ciên. e Letras Univ. São Paulo. Botanica*, 10.

MOSS D. N., 1962. The limiting carbon dioxide concentration for photosynthesis. *Nature*, **193**, 4815, 587.

MOSS D. N., MUSGRAVE R. B., LEMON E. R., 1961. Photosynthesis under field conditions III. Some effects of light, carbon dioxide, temperature and soil moisture on photosynthesis, respiration and transpiration or corn. *Crop. Sci.*, **1**, 2, 83-87.

MÜLLER D., 1928. Die Kohlensäureassimilation bei arktischen Pflanzen und die Abhängigkeit der Assimilation von der Temperatur. *Planta*, **6**, 22.

MÜLLER D., 1932. Analyse der verminderten Stoffproduktion bei Stickstoffmangel. *Planta*, **16**, 1-9.

MURATA, YOSHIO, JUNICHIRO, IYAMA, 1960. Studies on photosynthesis in upland field crops. I : Diurnal changes in the photosynthesis of eight summer crops growing in the field (J., an.) *Proc. Crop. Sci. Soc Jap.*, **29**, 1, 151-154.

NATR L., SPIDLA J., 1961. Application of the leaf disk method to the determination of photosynthesis in cereals. *Biol. Plant. Tchec.*, **3**, 245-251.

NICHIPOROVICH A. A., 1956. *Photosynthèse et théorie pour l'augmentation des rendements* (en russe). Timirjazevskie utenija XV. Moscou.

NICHIPOROVICH A. A., 1962. Sun, photosynthesis, crop. *Priroda*, **51**, 6, 19-28.

NICHIPOROVICH A. A., VLASOVA M. O., 1961. On the formation and efficiency of photosynthesis apparatus of agricultural plant, during the vegetation period. *Fiziol. Rasten*, **8**, 1, 13-18.

NOFFSINGER T. L., 1962. World population and maximum crop yield. In TROMP S. W. : *Biometeorology*, 461-470, PERGAMON Press, Oxford, Londres, New York, Paris.

NORTH C., 1956. A technique for measuring structural features of plant epidermis using cellulose acetate films. *Nature*, **178**, 1186-1187.

OPPENHEIMER H. R., 1952. Water requirements and irrigation of Citrus groves. *13th internat. Hort. Cong.*, 1267-1274.

OPPENHEIMER H. R., MENDEL K., 1934. Some experiments on water relations of Citrus trees. *Hadar*, **2**, 3, 6.

PARCEVAUX S. de, 1961. Tests physiologiques permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes. *Ann. agron.*, **12**, 1, 75-80.

PARCEVAUX S. de, 1962. Une méthode de mesure sur le terrain de la transpiration végétale. *Recherches sur la zone aride*, Coll. de Montpellier (sous presse), UNESCO.

PENMAN H. L., 1951. The water balance of catchment areas. *Union géodésique et géophysique inter.* (Bruxelles 1951), **3**, 434-442.

PENMAN H. L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Netherl. J., Agric. Sci.*, **4**, 9-30.

PENMAN H. L., LONG I. F., 1960. Weather in wheat : an essay in micrometeorology. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 367, 16-50.

PETINOV N. S., 1961. Base physiologique pour une bonne efficacité d'une irrigation intermittente des plantations de Thé. (en russe) *Tzv. AK. NAUK. SSSR. Ser. Biol.*, **5**, 717-728.

PISEK A., 1960 *a*. The nature of the temperature optimum and minimum of photosynthese. *B. Res. Counc. Israel, Sect.* D, **8**, 3-4, 285-289.

PISEK A., 1960 *b*. Pflanzen der Arktis und des Hochgebirges. In RUHLAND W. *Encyclopedia of plant physiology*, **5**, 376-414. Springer-Verlag, Berlin.

PISEK A., BERGER E., 1938. Kutikuläre Transpiration und Trockenresistenz isolierter Blätter und Sprosse. *Planta*, **28**, 124.

PISEK A., CARTELLIERI E., 1932. Zur Kenntnis des Wasserhaushaltes der Pflanzen. *Jb. wiss. Bot.*, **75**, 643.

PISEK A., TRANQUILLINI W., 1954. Assimilation und Kohlenstoffhaushalt in der Krone von Fichten (*Picea excelsa*) und Rotbuchenbäumen (*Fagus silvatica*). *Flora*, **141**, 237.

PISEK A., WINCKLER E., 1956. Die Schliessbewegung des Stomata bei ökologisch verschiedenen Pflanzentypen in Abhängigkeit vom Licht. *Planta*, **42**, 253-278.

PONOMAREVA M. M., 1960. Influence de la concentration du CO_2 sur l'intensité de la photosynthèse. *Eksper. Bot. SSSR.*, **4**, 2, 14, 54-72.

POWELL R. W., 1940. Further experiments on the evaporation of water from saturated surface. In : *Trans. Inst. Chem. Engrs, Lond.*, **18**, 36-55.

RABINOVITCH E. I., 1945. *Photosynthesis and related Processes*. Interscience Publishers Inc. New York.

REINAU E. H., 1954. Schwellenwert der CO_2 in Luft der Grüngrenze eines Zuckerrübenchlages bei Gewitterregen. *Ber. dtsch. bot. Ges.*, **67**, 44-47.

ROBELIN M., 1961. Éléments sur la rentabilité de l'irrigation. *Ann. agron.*, **12**, 1, 65-73.

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Évapotranspiration et rendements culturaux. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1774-1776.

*RUHLAND W., 1956. *Handbuch der Pflanzenphysiologie* III. Pflanze und Wasser, 1073 p. Springer-Verlag. Berlin.

*RUHLAND W., 1960. *Handbuch der Pflanzenphysiologie* V. Die CO_2 Assimilation. 868 p. Springer-Verlag, Berlin,

RYCHNOVSKA M., BARTOS J., 1962. Measurement of photosynthesis by the dry weight increment of samples composed of leaf segments. *Biol. Plantarum Tchec.*, **4**, 2, 91-97.

SAAD I., 1954.Studies on the physiology of the cotton plant. IV. Photosynthesis of cotton leaves under natural conditions. VI. The effect of shading debudding and watering upon the rate of photosynthesis of cotton leaves. *Proc. Egypt. Acad. Sci.*, **10**, 73-88, 94-106.

SALISBURY E. J., 1927. On the causes and ecological signifiance of stomatal frequency, with special reference to the woodlandflora. *Philos. Transp. Roy. Soc. Lond.*, Ser. B., **216**, 1.

SARVELLA P., MEYER J. R., OWINGS A., 1961. A scotch tape method for counting or measuring stomata *Crop. Sci.*, **1**, 1, 81-82.

SHAH S. R. H., 1962. *Studies on wind protection*. Meded. N R 60, 113 p. Arnhem.

SHANTZ H. L., PIEMEISEL L. N., 1927. The water requirement of plants at Akron, Colorado. *J. Agric. Res.*, **34**, 1093-1190.

SHMUELI E., 1954. Irrigation studies in the Jordan valley. I. Physiological activity of the banana in relation to soil moisture. *Bull. Res. Counc. Israel*, **3**, 228-247.

SIERP Y., SEYBOLD A., 1927. Untersuchungen zur Physik der Transpiration. *Planta*, **3**, 115.

SIVADJIAN J., 1959. Dosage hygrophotographique de la quantité d'eau perdue par la transpiration foliaire. *Bull. Soc. Bot. France*, **106**, 5-6, 197-200.

*SLATYER R. O., 1961. *Practical microclimatology*, with special reference to the water factor in soil-plant-atmosphere relationships. 250 p., UNESCO.

STANESCU P. P., 1936. Daily variations in products of photosynthesis, water content, and acidity of leaves toward end of vegetative period. *Amer. J. Bot.*, **23**, 374-379.

STÅLFELT M. G., 1929. Die Abhängigkeit der Spaltöffnungsreaktionen von der Wasserbilanz. *Planta*, **8**, 287.

*STÅLFELT M. G., 1932. Der stomatäre Regulator in der pflanzlichen Transpiration. *Planta*, **17**, 22-85.

STÅLFELT M. G., 1935. Die Spaltöffnungsweite als Assimilationsfaktor. *Planta*, **23**, 715.

STÅLFELT M. G., 1955. The stomata as a hydrophotic regulation of the water deficit of the plant. *Physiol. Plant.*, **8**, 572-593.

*STÅLFELT M. G., 1956. Morphologie und Anatomie des Blattes als Transpirationsorgan. Die cuticuläre Transpiration. Die stomatäre Transpiration und die Physiologie der Spaltöffnungen. In RUHLAND W. : *Handbuch der Pflanzenphysiologie, III*, 324-341, 342-350.

STÅLFELT M. G., 1959. The effect of carbon dioxide on hydroactive closure of the stomatal cells. *Physiol. Plant.*, **12**, 4, 691-705.

STÅLFELT M. G., 1960. Das Kohlendioxyd. Temperatur. Die Frage der begrenzenden Factoren (Allgemeines). Das Zusammenwirkung der äusseren und inneren Faktoren. Die Abhängigkeit von zeitlichen Faktoren. In RUHLAND W. : *Handbuch der Pflanzenphysiologie, V*, 81-99, 100-117, 213-225, 226-254.

STANHILL G., 1960. The relationship between climate and the transpiration and growth of pastures. *Proc. 8th. Intern. Grassland Congr.*, 12 A/6.

STOCKER O., 1930. Über die Messung von Bodensaugkräften und ihren Verhältnis zu den Wurzelsaugkräften. *Z. Bot.*, **23**, 27-56.

STOCKER O., 1933. Transpiration und Wasserhaushalt in verschiedenen Klimazonen II. Untersuchungen in der ungarischen Alkalisteppe. *Jb. wiss. Bot.*, **78**, 751-856.

STOCKER O., 1947. Probleme der pflanzlichen Dürreresistenz. *Naturwiss*, **34**, 362-371.

STOCKER O., 1952. *Grundriss der Botanik.* Springer-Verlag, Berlin.

STOCKER O., 1954. Der Wasser und Assimilationshaushalt südalgerischer Wüstenpflanzen. *Ber. dtsch. bot. Ges.*, **67**, 289-299.

*STOCKER O., 1956. Messmethoden der Transpiration. Die Abhängigkeit der Transpiration von den Umweltfaktoren. Die Dürreresistenz. In RUHLAND W. : *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, III, 293-311, 436-488, 696-741. Springer-Verlag, Berlin.

STOCKER O., 1960. Die photosynthetischen Leistungen der Steppen-und Wüstenpflanzen. In RUHLAND W. : *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, V, 460-491. Springer-Verlag, Berlin.

STROGONOV B. P., 1960. The significence of salt resistance of plants in the fight against salinization of soils. *4th. Congr. irrigation and drainage*, Madrid, **13**, 139-160. ICID. New Delhi.

TAYLOR S. A., SLATYER R. O., 1961. Proposals for an unified terminology in studies of plant soil-water relationships. *Recherches sur la zone aride*, **16**, 339-349. Coll. de Madrid, UNESCO.

THOMAS HILL, 1949. *Photosynthesis in Plants.* Iowa State Coll. Press.

TULAÏKOV N. M., 1922. Das Wasserbedürfniss der Pflanzen nach den Ergebnissen der Vegetationsversuche. (Rus. all.) *Ber. Landw. Landervers. Stat. Saratov*, 1/2, 21-36 ; 3/4, 1-14.

TUMANOV J. J., 1927. Ungenügende Wasserversorgung und das Welken der Pflanzen als Mittel zur Erhöhung ihrer Dürreresistenz. *Planta*, **3**, 391.

*UNGER K., 1959. Die Anwendung radioaktiver Strahlungsquellen zur berührunglosen Massenbestimmung von Pflanzenbeständen und Einzelpflanzen am natürlichen Standort. *Der Züchter*, **29** B, 47.

VERDUIN J., 1959. Photosynthesis in conifers computed per unit leaf area, dry weight, volume, chlorophyll content and respiratory rate. *Ecology*, **40**, 4, 738.

VERDUIN J., WHITWER E. E., LOWELL B. C., 1959. Maximal photosynthesis rates in nature. *Science*, **130**, 3370, 268-269.

VRIES D. A. de, DUIN R. H. A. VAN, 1953. Some considerations on the diurnal variation of transpiration. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **1**, 1, 27-34.

WALTER H., 1952. Méthode simple d'interprétation écologique du CO_2 sur le terrain. *Ber. dtsch. Bot. Ges.*, **65**, 6, 175-182.

WEISS A., 1890. Weitere Untersuchugen über die Zahlen- und Grössenverhältnisse der Spaltoffnungen mit Einschluss der eigentlichen Spalte derselben. *Sitzgsber. Akad. wiss. Wien, Math. naturwiss.*, **1**, 99.

WHITEHEAD F. H., 1957. *Wind as a factor in plant growth. Control of the environment.* Proc. Univ. Nottingham, *4th* Easter School in Agric. Sci., 84-95.

WILLCOX O. W., 1959. Footnote to Freedom from want. *J. Agric. Food Chem.*, **7**, 12.

WILLSTÄTTER R., STOLL A., 1918. *Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure*, Berlin.

WILSON C. C., 1948. The effect of some environmental factors on the movements of guards cells. *Plant. Physiol.*, **23**, 5-37.

WILSON J. W., WADSWORTH R. M., 1958. The effect of wind speed on assimilation rate. A reassesment. *Ann. Bot.*, **22**, 86, 285-290.

WIT C. T. de, 1958. Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk. Onderzoek*, **64**, 88 p.

WIT C. T. de, 1959. Potentiel photosynthesis of crop surfaces. *Neth. J. Agric. Sci.*, **7**, 141-149.

WOOLLEY J. T., 1961. Mechanisms by which wind influences transpiration. *Plant Physiol.*, **36**, 1, 112-114.

WORMER Th. M., OCHS R., 1959. Humidité du sol, ouverture des stomates et transpiration du palmier à à huile et de l'arachide. *Oléagineux*, **14**, 571-580.

ZALENSKIJ O. V., 1954. Photosynthèse dans les conditions naturelles. Essais de Botanique. *Acad. Sci. U. R. S. S.* Moscou-Léningrad, 74-87.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 743-824

ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE, ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE, ET PRODUCTION AGRICOLE

R. J. BOUCHET

Station centrale de Bioclimatologie agricole.
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

PLAN

INTRODUCTION 744

PREMIER CHAPITRE. — *Évapotranspirations réelle et potentielle : facteurs climatiques* 744

Introduction
I. — Échelle du bilan et hypothèse de départ
II. — Bilan d'énergie. ETR. ETP.
III. — Discussion
Conclusion.

DEUXIÈME CHAPITRE. — *Évapotranspirations potentielle et réelle au niveau de la feuille. Relations avec la photosynthèse* 759

Introduction
I. — La couche limite.
a) Définition
b) Propriété de la couche limite laminaire
c) Propriété des couches limites thermiques et de diffusion gazeuse (coefficients d'échanges)
II. — Évapotranspirations réelle et potentielle
a) Définitions.
b) Bilan d'énergie
c) Température d'un organe végétal
d) Transpiration réelle
e) Régulation stomatique et cuticulaire. Transpiration relative
III. — Évapotranspiration réelle et production de matière sèche
Conclusion.

TROISIÈME CHAPITRE. — *Évapotranspiration potentielle et évaporation sous abri* 787

Introduction

I. — Formule donnant ETP à partir de l'évapotranspiration sous abri
II. — Discussion de la formule III, 13
III. — Utilisation de la formule
IV. — Variations de ETP dans le temps et l'espace

Conclusion

QUATRIÈME CHAPITRE. — *Évapotranspiration réelle et production de matière sèche. Amélioration de la production par l'abaissement de l'évapotranspiration potentielle* 799

Introduction

I. — Représentation schématique de l'évapotranspiration des végétaux
a) Rappel des définitions de ETP à différentes échelles
b) Représentation schématique de ETR du végétal
1°) au niveau de la feuille
2°) au niveau de la plante et du couvert végétal

II. — Interprétation de faits agronomiques.
a) Production de matière sèche en fonction de ETR et ETP
b) Paramètres commandant l'offre maximum (q_{max})
c) Exemples agronomiques

III. — Méthodologie et voies d'amélioration de l'efficience de l'eau
a) Méthodologie
b) Modifications climatiques
c) Efficience de l'eau consommée

Conclusion

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 817

INTRODUCTION

La vie végétale suppose une certaine consommation d'eau. L'évapotranspiration réelle traduit l'évaporation du sol et la transpiration cuticulaire et stomatique de la plante. Il est couramment admis que la production de matière sèche augmente pour une espèce avec les apports d'eau. On arrive ainsi à définir une évapotranspiration potentielle qui correspondrait au rendement optimum et à la consommation d'eau maximum possible sous un climat donné quand l'énergie disponible pour cette évaporation serait le seul facteur limitant (1). La définition de l'évapotranspiration potentielle et son évaluation ont donné lieu a une très abondante littérature. Il en est de même des relations existant entre l'évapotrans-

(1) Dans le texte, les évapotranspirations réelle et potentielle seront exprimées indifféremment en hauteur d'eau comme les pluies (mm par exemple) ou en énergie nécessaire à l'évapotranspiration de cette hauteur d'eau (59,7 cal $cm^{-2}mm^{-1}$ à 0°). La transpiration et l'évaporation étant un même phénomène au point de vue énergétique, le terme évapotranspiration désignera indifféremment l'un ou l'autre de ceux-ci.

piration réelle et l'évapotranspiration potentielle d'une part et la production agricole d'autre part. Généralement, ces études sont envisagées sous l'angle de bilans portant sur des périodes dont la durée se situe entre quelques semaines et l'année. Elles sont conçues en vue de permettre l'irrigation de base en zone sèche ou de complément en zone subhumide : définition des besoins réels, définition des besoins maximums possibles, gain de production à atteindre, efficience de l'eau consommée.

Dans l'étude qui va suivre, on se propose d'examiner l'évapotranspiration réelle (ETR), potentielle (ETP) et la production végétale à une échelle de temps inférieure ou égale à 24 heures afin d'analyser les multiples facteurs qui interfèrent ou se compensent dans les termes du bilan portant sur de plus longues périodes. Les relations établies entre ETR, ETP et la production de matière sèche permettront de voir quels sont les moyens d'action envisageables, non seulement pour améliorer la production dans les cas où elle est déficitaire par suite d'une mauvaise alimentation hydrique, mais, surtout, en vue de tenter de dégager de nouvelles potentialités de production agricole.

Cette analyse des mécanismes sera faite essentiellement sous l'angle des facteurs climatiques, c'est-à-dire en dehors de la plante et du sol. Cependant, elle s'intègre dans un travail d'équipe qui se propose de faire ressortir l'interdépendance et la continuité des phénomènes dans la circulation de l'eau depuis le sol jusque dans l'atmosphère. Pour l'étude de l'eau dans le sol et dans la plante, le lecteur prendra connaissance des articles respectifs de M. HALLAIRE et S. de PARCEVAUX.

La présente étude comprend quatre chapitres qui pourront être considérés séparément [1].

Le 1er chapitre sera réservé à l'étude à l'échelle de la région, de ETR et de ETP en tant que facteur climatique. Des relations seront établies entre ces termes et les facteurs météorologiques. Il sera alors possible de voir dans quelle limite l'action humaine pourra modifier le climat (irrigation, brise-vent, etc.) dans un sens favorable à la production agricole.

Le 2e chapitre portera sur l'étude de ETR et ETP en valeur instantanée à l'échelle de la feuille. Le rôle des différents facteurs climatiques (rayonnement, vent, etc.) sera analysé et l'action de ceux-ci sur la régulation stomatique et cuticulaire sera précisée. On constatera que la plupart des végétaux voient leurs échanges gazeux avec le milieu extérieur très fortement réduits par suite de cette régulation.

[1] Dans chaque chapitre, on cherchera à préciser les définitions à donner respectivement aux termes ETR, ETP et production de matière sèche. Pour éviter toute indétermination, nous insisterons notamment sur l'échelle des phénomènes étudiés, échelle de temps, échelle d'espace. Ces notions seront particulièrement utiles dans la méthodologie de l'étude du facteur eau. On s'appliquera à relever les déformations subies par les définitions à chaque changement d'échelle. Ainsi, quand on passe de l'étude de la transpiration instantanée d'une feuille à sa transpiration au cours de la journée ou à celle de l'ensemble de la plante et à celle de la population d'un champ, les facteurs considérés comme une cause à une certaine échelle peuvent être pris comme des effets à une échelle supérieure. Les changements d'échelle font apparaître des facteurs limitants d'un autre ordre.

En outre, l'étude sera envisagée essentiellement du point de vue de la circulation de l'eau et de ses conséquences immédiates. Très souvent, sauf indications contraires, le raisonnement sera conduit avec l'hypothèse « toutes autres conditions égales ». Cependant, les phénomènes physiques ou biologiques font intervenir des phénomènes de compensation, ou de régulation, qui limitent la zone où cette hypothèse est exacte. Même en dehors de ces limites, ce type de raisonnement permettra de dégager les tendances des phénomènes étudiés et surtout de voir le poids respectif de chaque facteur dans le phénomène résultant.

Dans chaque chapitre, les formules proposées feront intervenir les différents facteurs climatiques ou biologiques et permettront d'expliquer les résultats très variés, voire contradictoires, trouvés dans la littérature. On essaiera de tirer quelques conclusions en ce qui concerne la méthodologie pour l'étude de ces phénomènes et on tentera d'en dégager l'intérêt agronomique.

Il sera alors possible de juger de l'action indirecte de celle-ci sur l'activité photosynthétique. Il apparaîtra que les valeurs instantanées trop élevées de ETP constituent un facteur limitant de la production de matière sèche.

Le 3e chapitre présente une formule donnant les valeurs quotidiennes de ETP à partir des simples données climatiques recueillies sous abri. Cette formule déduite de la formule de PENMAN doit permettre d'étudier les variations de ETP dans le temps à une échelle de temps inférieure à 24 h et dans l'espace, à une échelle de distance de l'ordre du kilomètre. Malgré certaines limites d'emploi, elle devrait être utile pour l'étude des fluctuations de ETP et son influence sur la production de matière sèche.

Dans le 4e chapitre, on essaiera de présenter la synthèse agronomique des chapitres précédents. Figurée sous forme d'un schéma, elle montrera que les végétaux cultivés dans les meilleures conditions apparentes d'alimentation en eau (réserve du sol importante ou irrigation) souffrent d'un déséquilibre instantané prolongé au niveau de la feuille. Il en résulte que ces végétaux voient indirectement leur activité photosynthétique limitée durant des périodes très importantes de leur vie. Dans ces conditions, il semble logique de supposer que l'on ne connaît pas le rendement potentiel de nos meilleures espèces cultivées et qu'une amélioration de la production devrait être recherchée par un abaissement de ETP. Diverses solutions seront indiquées ou rappelées (irrigation, brise-vent, cultures associées, etc.).

En conclusion, on remarquera que si l'augmentation de la production peut être recherchée par une meilleure « mobilisation » de l'eau disponible, on doit surtout tendre à abaisser ETP pour améliorer la productivité de l'eau consommée. Les techniques proposées tendent pour toutes les échelles (au niveau de la feuille ou de la région) à rompre le complexe climatique lumière-ETP pour utiliser au maximum le facteur lumière et abaisser ETP. Ainsi, l'action sur le climat par des moyens agronomiques devrait contribuer à dégager de nouvelles potentialités de production agricole.

PREMIER CHAPITRE

ÉVAPOTRANSPIRATIONS RÉELLE ET POTENTIELLE : FACTEURS CLIMATIQUES

L'évapotranspiration réelle, ETR, représente l'eau réellement perdue sous forme de vapeur par une région, l'évapotranspiration potentielle, ETP, l'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions, quand elle est en abondance dans le sol. Ces deux données sont évidemment indispensables à l'hydrologue pour étudier la circulation de l'eau ou à l'agronome pour définir les besoins en eau des cultures et chercher à les satisfaire.

On se propose de montrer, en utilisant la méthode du bilan d'énergie (1), les liaisons qui existent non seulement entre ETP et ETR mais également entre ces termes et les différents éléments du bilan énergétique (rayonnement global, rayonnement de grande longueur d'onde, etc.). Les relations simples établies permettront de mieux définir ETP ou ETR et de préciser comment ils varieront respectivement quand on cherchera à modifier le climat sur des zones plus ou moins vastes soit en irriguant soit en changeant la couverture du sol. Cette étude sera précédée d'un rappel des échelles utilisées en météorologie. Cette notion d'échelles servira à présenter les hypothèses de départ pour l'étude du bilan. Les conclusions sur les modifications climatiques et la consommation d'eau seront reprises dans le 4e chapitre pour l'étude de l'efficience de l'eau au point de vue production agricole.

I. — ÉCHELLE DU BILAN ET HYPOTHÈSE DE DÉPART

La méthode du bilan d'énergie permet de calculer ETR comme étant l'inconnue dans l'équation. Par ailleurs, de nombreux auteurs ont cherché à relier ETP aux différents termes du bilan d'énergie. Ainsi, PENMAN évalue ETP en utilisant le

(1) On admettra comme positive l'énergie reçue sur la surface considérée, (sol ou plante) comme négative l'énergie perdue.

On utilisera les symboles suivants :

- a : albédo ; fraction réfléchie du rayonnement global (exprimée en pourcentage) ;
- a' : fraction réfléchie du rayonnement atmosphérique ;
- a'' : émissivité ;
- Rg : rayonnement global (rayonnement d'origine solaire $\leqslant 5\ \mu$ reçu sur une surface horizontale) ;
- Ra : rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde $> 5\ \mu$;
- σT^4 : rayonnement de la terre à la température absolue T avec une émissivité égale à l'unité ;
- Rn : $(1 - a)Rg + (1 - a')Ra - a''\sigma T^4$ ou rayonnement net ;
- E : énergie mise en jeu par l'évaporation ;
- C : énergie mise en jeu par la condensation ;
- Q : énergie échangée par conduction-convection par le système considéré avec l'extérieur ;
- Qs : énergie échangée par conduction dans le sol ;
- Qa : énergie échangée par conduction-convection dans l'air ; Qa comprend les échanges de chaleur de différentes échelles ;
- ETR : énergie correspondant à l'évapotranspiration réelle ;
- ETP : énergie correspondant à l'évapotranspiration potentielle.

rayonnement net (Rn) et le pouvoir évaporant de l'air (fonction du déficit de saturation de l'air et du vent).

Cependant, il convient d'abord de définir par ses dimensions le système sur lequel portera l'étude du bilan. On sera conduit à utiliser couramment la notion d'échelle dont on rappellera succinctement la définition. Les météorologistes conviennent de distinguer pour l'étude des phénomènes atmosphériques, différentes classes de phénomènes (voir tabl. 1) qui permettent de négliger les phénomènes d'échelle inférieure par rapport au mouvement macroscopique considéré.

TABLEAU I

Échelle (2) (symbole utilisé dans le texte)		Échelle de temps	Échelle de distance	Effets d'oasis (1) correspondant (symbole utilisé dans le texte)
Moléculaire	e_1	10^{-9} seconde		Q_1
Turbulente	e_2	1 s. à quelques minutes.	quelques centaines de m.	Q_2
Convection et mouvement associés	e_3	10 mn à quelques heures	quelques kilomètres	Q_3
Cyclonique	e_4	3 à 4 jours	1 000 à 2 000 km.	Q_4
Planétaire	e_5	10 à 30 jours	5 000 à 10 000 km.	Q_5

(1) On définit en météorologie des échelles de turbulence qui permettent de négliger les phénomènes dont l'échelle est petite par rapport au mouvement macroscopique considéré.
(2) Voir définition dans le texte.

Pour éviter de prendre en considération les phénomènes d'accumulation et de restitution de chaleur durant les phases diurne et nocturne, le bilan sera fait sur une période de 24 heures. L'état final étant alors peu éloigné de l'état initial, les variations de température du système peuvent être négligées ou intégrées dans les échanges de chaleur avec l'extérieur du système.

Sur une verticale, le système comprendra l'ensemble de la masse végétale, une tranche superficielle du sol, une tranche inférieure de l'atmosphère ; les dimensions verticales de ces tranches sont telles que les variations nycthémérales de température restent appréciables. Ce système a donc des dimensions en altitude légèrement variables d'un jour à l'autre, mais dont l'ordre de grandeur, de quelques dizaines de centimètres dans le sol, va de quelques dizaines à quelques centaines de mètres au-dessus du sol. Le bilan étant fait sur une période de 24 heures, les échanges de chaleur du système durant cette période, en dehors des phénomènes de rayonnement et d'évaporation ont lieu par conduction dans les couches profondes du sol (Qs) et par convection dans l'air (Qa) vers les hautes couches de l'atmosphère.

Si ce système est situé dans une zone ne présentant pas, pour diverses raisons, les mêmes caractéristiques climatiques, il existera des échanges latéraux d'énergie aux parois qu'il va falloir analyser.

Les échanges latéraux par conduction dans le sol sont négligeables. Il n'en est pas de même des échanges latéraux dans l'atmosphère dus aux mouvements d'uniformisation des masses d'air que l'on désignera sous le nom général « effet d'oasis ». Étant donné l'hétérogénéité d'un point à un autre du type de sol, du couvert végétal, des phénomènes d'évaporation, les mouvements latéraux d'énergie ou effet d'oasis sont la règle dans les conditions naturelles.

On peut représenter schématiquement ce phénomène de la manière suivante (fig. 1). Si dans une zone plane et homogène apparaît une hétérogénéité (caractéristiques du sol telles que conductibilité thermique, chaleur spécifique, humidité, nature du couvert végétal, ETR différent, etc.), il se développe dans le sens de

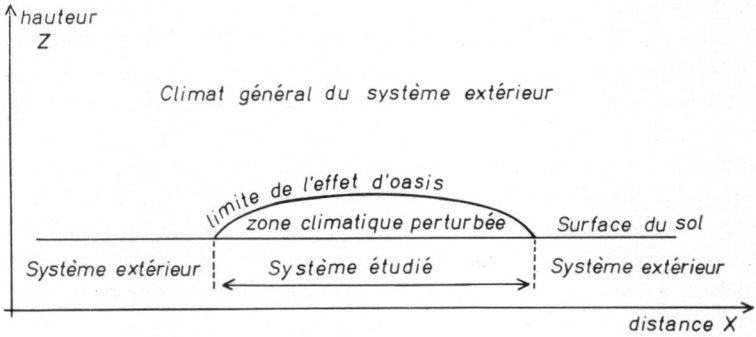


FIG. 1. — *Développement vertical de la zone climatique perturbée en fonction des dimensions horizontales d'une zone hétérogène située dans un climat général donné*

la circulation d'air, une zone perturbée où les facteurs du milieu se trouvent modifiés par rapport au climat général du fait de l'hétérogénéité. Sans ce mouvement latéral des masses d'air accompagnées d'échange d'énergie, la zone perturbée verrait son climat évoluer dans le temps pour tendre à s'équilibrer avec la surface présentant l'hétérogénéité ; l'échange d'énergie latéral au sein de la zone perturbée maintient dans celle-ci un régime permanent qui tient compte de cet apport latéral. L'effet d'oasis correspond donc à une intrusion du système extérieur sur le système étudié, non seulement par ses bords immédiats mais par l'ensemble de la limite de la zone perturbée.

La perturbation s'élève d'autant plus en hauteur que la zone hétérogène est étendue. Cependant l'influence du climat extérieur au système diminue avec l'éloignement des bords et avec l'accroissement des dimensions du système. Ce problème sera traité plus complètement à échelle fine dans le 2e chapitre au sujet de la couche limite au voisinage des organes végétaux. Cependant, la perturbation apparaît toujours comme une « lentille plate » pour laquelle l'épaisseur ou la hauteur est faible par rapport aux dimensions horizontales. On peut donc définir pour chaque échelle météorologique et chaque échelle d'hétérogénéité, un effet d'oasis d'échelle correspondante qui donne l'échange latéral d'énergie Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5. Ce sont ces échanges que l'on cherchera à préciser ultérieurement dans l'équation du bilan d'énergie et qui vont intervenir pour nous aider à définir les dimensions horizontales à donner au système.

Comme on se propose de relier ETR aux différents termes du bilan d'énergie, ETR doit être considérée comme uniforme sur toute la surface du système. Il s'agit donc de déterminer à partir de quelle surface minimale, l'évapotranspiration réelle peut, en agissant sur le bilan d'énergie, affecter les facteurs climatiques qui servent à définir le climat. C'est seulement lorsque cette surface minimale sera atteinte, que l'on sera assuré d'avoir une excellente liaison entre les facteurs climatiques (θa, θr, vent, etc.) [1] et ETR puisque ces facteurs ne seront plus seulement à considérer comme une cause possible plus ou moins directe, mais également comme un effet. La zone minimale présentant le caractère d'uniformité devra donc être telle que la perturbation atteigne le niveau de référence des données climatiques. Le système devra être d'autant plus étendu que les facteurs du milieu seront pris à un niveau plus élevé.

Généralement, les données climatiques sont recueillies à 2 m au-dessus du sol avec des instruments ayant des constantes de temps de l'ordre de la minute. On devra donc, à priori, ne considérer que les phénomènes thermiques ayant une échelle supérieure ou égale à celle de la turbulence proprement dite ($\geqslant e_2$)

Les échanges de chaleur de plus grande échelle (Q_3, Q_4, Q_5) sont alors intégrés dans le terme Qa du bilan d'énergie. Ils contribuent à définir le climat. Ainsi, les effets d'oasis de grande échelle tels que ceux existant entre les zones maritimes et les continents se retrouvent dans les données climatiques des réseaux météorologiques. De même, à l'échelle de la demi-journée, les brises de mer ou de terre peuvent être traitées comme des effets d'oasis d'échelle e_3.

Les échanges de chaleur liés à des échelles inférieures à e_2 sont, d'après les notions même d'échelles, négligeables et peuvent être considérés comme de simples mouvements d'uniformisation au sein du système, qui n'affectent pas le climat tel qu'on le définit.

Pour respecter l'échelle de la turbulence, la zone considérée pour le bilan d'énergie devrait présenter le caractère d'uniformité sur des distances de quelques centaines de mètres, voire quelques kilomètres ; l'étendue minimale en surface est donc de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares.

Sur l'ensemble de cette surface, ETR sera uniforme par hypothèse. Si l'évapotranspiration réelle autour de ce système est différente de celle située à l'intérieur il existera des effets d'oasis créés par cette hétérogénéité ; ceux-ci seront d'une échelle d'autant plus importante que la zone considérée sera grande ; dans le cadre de notre définition, ils seront inférieurs ou égaux à la turbulence. L'évapotranspiration potentielle sera donc variable au sein du système en fonction de la distance à ces bords. On considérera alors l'évapotranspiration potentielle au centre du dispositif, point où elle est la plus faible dans le cas d'une zone plus humide (oasis), point où elle est la plus forte dans le cas d'une zone plus sèche (clairière, île). Si la surface du système était plus importante, ETP au centre diminuerait ou augmenterait, mais les facteurs climatiques tels qu'on les considère généralement, commenceraient alors à être affectés, ce qui serait contraire à l'hypothèse de départ puisque l'on se propose de définir l'ETP du climat initial et non pas l'ETP modifiée par l'apport d'eau.

En conclusion, ETP ne peut se définir au niveau de l'abri météorologique à

[1] θ_a et θ_r représentant respectivement la température de l'air et celle du point de rosée.

2 m qui sert à recueillir les données climatiques que comme l'évapotranspiration potentielle au centre d'une zone uniforme au point de vue sol, végétation et évapotranspiration d'au moins quelques dizaines d'hectares.

Ainsi, les raisonnements qui vont suivre ne pourront pas s'appliquer en toute rigueur à des zones même homogènes n'ayant pas de dimensions suffisantes et à fortiori, à des zones hétérogènes. On rencontrera donc de grandes difficultés pour définir ETR ou ETP en tant que facteurs climatiques dans les zones de transition car les effets d'oasis d'échelle inférieure à celle qui permet de définir le climat modifieront les égalités proposées. Ces cas se rencontreront notamment pour le damier complexe que représente la végétation d'une zone de polyculture, pour les petites oasis en zone aride, les clairières dans les zones forestières, pour les côtes maritimes ou les bordures de massifs forestiers. Cependant, les équations proposées fournissent une approche du problème.

II. — Bilan d'énergie — ETR et ETP

Supposons un système uniforme réalisé, sur une période de 24 heures, le bilan énergétique ramené à l'unité de surface peut alors s'écrire :

$$(1 - a)Rg + (1 - a')Ra - (a'')\sigma T^4 - Q = E - C = ETR. \qquad (I, 1)^* \ (1)$$

En admettant dans la suite du texte que les termes de rayonnement ($R'g$, $R'a$, $\sigma'T^4$) comprennent toujours l'albédo (a, a') ou l'émissivité (a''), on aura :

$$R'g + R'a - \sigma'T^4 - Q = ETR \qquad (I, 2)$$

équation qui donne l'évapotranspiration réelle ETR de la zone considérée. Ainsi, ETR, plus ou moins limitée par l'intervention du facteur « eau », joue un rôle essentiel dans l'interaction des données physiques du climat par les termes σT^4, Q et dans une certaine mesure Ra et même Rg.

ETP correspond, par définition, au cas où l'énergie est le seul facteur limitant de l'évaporation quand l'eau est disponible et les surfaces d'échanges suffisantes. Étudions le passage de ETR à ETP dans le système précédemment défini. Désignons par ETP_0 la valeur de l'évapotranpiration potentielle lorsque ETP = ETR.

Supposons cette condition réalisée :

$$ETR = ETP = ETP_0 \qquad (I, 3)$$

et admettons que pour une raison indépendante des phénomènes énergétiques, ETR diminue. Ce cas pourrait résulter par exemple d'une période de sécheresse, de la maturité de la végétation, de sa coupe, etc. La diminution de ETR libère une énergie q_1 telle que ;

$$ETP_0 - ETR = q_1. \qquad (I, 4)$$

A l'échelle considérée, cette modification de l'équilibre à l'intérieur du système n'affecte pas le rayonnement global et n'intervient que très faiblement sur le terme Ra par l'intermédiaire de la température et de l'humidité des très basses couches atmosphériques. La seule modification importante portera sur la température et sur la turbulence.

* Le chiffre romain indique le numéro du chapitre.

(1) les équations sont écrites comme si le terme Q d'échange avec le système intérieur correspondait à une pente d'énergie.

Elle entraînera une modification de ETP. Dans les meilleures conditions, c'est-à-dire dans le cas où la transformation ne modifie pas les échanges du système avec l'extérieur, l'énergie rendue disponible servira à accroître ETP. Ainsi, sans modification du climat initial, au point de vue énergétique et notamment sans variation des différents effets d'oasis primitifs, on aura :

$$\mathrm{ETP} = \mathrm{ETP}_0 + q_1 \qquad \text{(I, 5)}$$

et d'après (I, 4)

$$\mathrm{ETP} = \mathrm{ETP}_0 + \mathrm{ETP}_0 - \mathrm{ETR} \qquad \text{(I, 6)}$$

ou

$$\mathrm{ETP} + \mathrm{ETR} = 2\ \mathrm{ETP}_0. \qquad \text{(I, 7)}$$

Ainsi, pour un climat donné, tout se passerait comme si on avait une symétrie entre ETP et ETR par rapport à une constante ETP_0. En fait, très généralement, la transformation n'aura pas lieu sans modification des échanges avec l'extérieur et les égalités se transforment en inégalités :

$$\mathrm{ETP} + \mathrm{ETR} \leqslant 2\ \mathrm{ETP}_0. \qquad \text{(I. 8)}$$

Cherchons à évaluer ETP_0 en fonction des facteurs climatiques. Considérons à nouveau l'équation générale du bilan (I, 1) en explicitant les pertes d'énergie de différentes échelles par conduction-convection contenues dans le terme Q :

$$\mathrm{ETR} = \mathrm{R}'g + \mathrm{R}'a - \sigma'\mathrm{T}^4 - \mathrm{Q}_s - \mathrm{Q}_3 - \mathrm{Q}_{4\text{-}5}. \qquad \text{(I, 9)}$$

Ainsi, lorsque, sous un climat général donné, ETR prend des valeurs différentes parce que les disponibilités en eau du sol sont plus ou moins grandes, la somme figurant dans le deuxième membre varie comme ETR. Les termes $\mathrm{R}'g$ et $\mathrm{Q}_{4\text{-}5}$ ne sont pas affectés par les variations de ETR à échelle inférieure à e_4. Par contre, les autres termes sont liés aux disponibilités en eau. On peut donc écrire (I, 9) sous la forme suivante :

$$\mathrm{ETR} = [\mathrm{R}'g - \mathrm{Q}_{4\text{-}5}] - [\sigma'\mathrm{T}^4 - \mathrm{R}'a + \mathrm{Q}_s + \mathrm{Q}_3] \qquad \text{(I, 10)}$$

et en désignant le second crochet par G

$$\mathrm{ETR} = [\mathrm{R}'g - \mathrm{Q}_{4\text{-}5}] - \mathrm{G}. \qquad \text{(I, 11)}$$

Sous un climat donné par $(\mathrm{R}'g - \mathrm{Q}_{4\text{-}5})$ les variations de ETR sont traduites par les variations de G.

Ainsi, pour une valeur définie de $\mathrm{R}'g - \mathrm{Q}_{4\text{-}5}$, les variations de ETR, G et ETP déduites de (I, 7) et (I, 11) peuvent être représentées comme l'indique la figure 2 *a*. Elle montre clairement comment ETP et les pertes G diminuent lorsque ETR augmente. Il faut donc déterminer la constante ETP_0.

Par définition, ETP correspond à la hauteur d'eau évaporée quand l'énergie est le seul facteur limitant. Si sur le système précédemment défini d'échelle e_2, on apporte l'eau de manière qu'elle ne soit plus facteur limitant, on observera une évapotranspiration ETR′ différente de ETR préexistante qui correspondrait au cas où l'eau disponible était un facteur plus ou moins limitant. ETR′ sera donc par définition égale à ETP (ETR′ = ETP). La variation de ETR′ est représentée sur

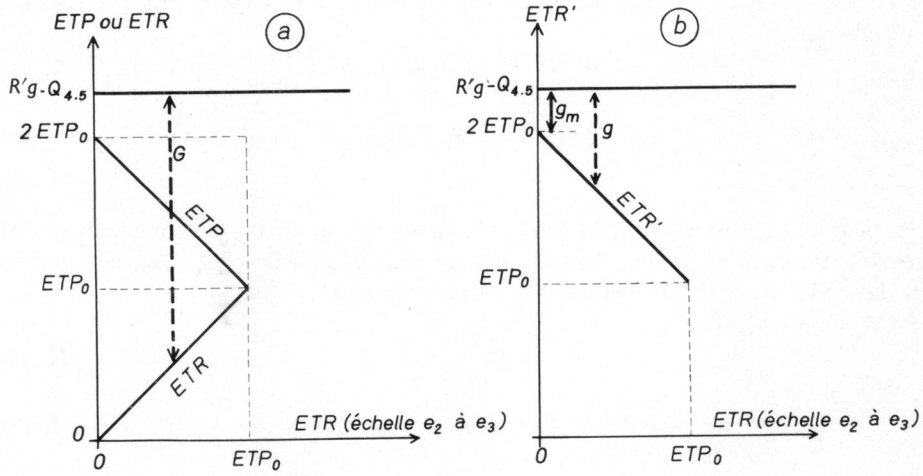


FIG. 2. — *Variations de ETR, ETR', ETP, G et g, en fonction de ETR*
Schéma (*a*) : l'eau est un facteur plus ou moins limitant dans la zone d'échelle e_2 à e_3.
Schéma (*b*) : l'eau n'est plus facteur limitant à l'échelle e_2 dans la zone d'échelle e_2 à e_3 du schéma (*a*

la figure 2 *b*. Elle représente la grandeur ETP considérée précédemment (fig. 2 *b*) qui varie de 2 ETP_0 à ETP_0 en fonction de ETR. La valeur de ETR portée en abscisses étant celle que l'on avait, soit avant d'imaginer l'apport d'eau si le système d'échelle e_2 est hétérogène par rapport au système extérieur d'échelle e_2 à e_3, soit dans le système d'échelle inférieur à e_3 qui entoure le système e_2 étudié si la zone est homogène. La valeur ETR' ainsi considérée n'est autre que l'évapotranspiration potentielle mesurée sur un lysimètre au sein d'un anneau de garde suffisant pour éviter les effets d'oasis d'échelle inférieure à e_2. Les pertes d'énergie de grande longueur d'onde, conduction, convection que l'on avait représentées par G sont alors désignées par g dans le système considéré comme isolé de l'extérieur. On aura :

$$ETR' = [R'g - Q_{4-5}] - g \qquad (I, 12)$$

ETR' est maximale en région aride ou ETR = 0. Soit g_m le minimum de g. On a alors :

$$ETR'_{max} = [R'g - Q_{4-5}] - g_m. \qquad (I, 13)$$

Par hypothèse, l'eau n'est plus facteur limitant sur le système considéré ; seule l'énergie le serait. La valeur maximale de ETR'_{max} serait donc atteinte pour, $g_m = 0$. En outre, g_m ne peut pas prendre une valeur négative car cela correspondrait à un apport de chaleur au système ce qui serait contraire à l'hypothèse de départ. Par ailleurs, g_m négatif se traduirait la nuit par des températures ascendantes, ce qui serait absurde.

Finalement, g_m ne peut avoir que des valeurs faibles ou nulles ; ETR' ne peut être au maximum que très voisine de $R'g - Q_{4-5}$.

$$ETR'_{max} \leqslant [R'g - Q_{4-5}]. \qquad (I, 14)$$

Comme ETR'_{max} correspond à ETP pour ETR = 0, c'est-à-dire à 2 ETP_o, il en résulte que :

$$2ETP_0 \leqslant [R'g - Q_{4-5}] \qquad (I, 15)$$

ou

$$\boxed{ETP_0 \leqslant 0{,}5\,[R'g - Q_{4-5}].} \qquad (I, 16)$$

ETP_o peut donc être reliée à la limite de manière simple au rayonnement global absorbé $[(1 - a)Rg]$ et aux effets d'oasis de grande échelle Q_{4-5}. On verra par la suite la vérification expérimentale de ce raisonnement.

On déduit alors de

$$ETP \leqslant G \qquad (I, 17)$$

$$\boxed{ETP \leqslant \sigma'T^4 - R'a + Q_s + Q_3.} \qquad (I, 18)$$

L'évapotranspiration potentielle s'exprime donc en fonction du bilan radiatif de grandelo ngueur d'onde $(\sigma'T^4, R'a)$ dans la mesure où le terme $(Q_s + Q_3)$ n'est pas trop grand sur une période de 24 heures. Ce cas se rencontre souvent ; la relation (I, 18) permet de comprendre comment il est possible de relier ETP pour un lieu donné et une certaine durée du jour à l'amplitude nycthémérale de température [température maximum (θ_M) — température minimum (θ_m)]. Cette amplitude traduit ces échanges de rayonnement de grande longueur d'onde durant la phase nocturne de refroidissement $(\sigma'T^4. - R'a)$. Elle est proportionnelle au terme G. On remarque. que l'amplitude journalière de température va donc diminuer quand ETR s'accroît. A la limite, elle variera, toutes autres conditions restant égales, du simple au double quand ETR variera de ETP_0 à zéro.

Finalement, l'égalité (I, 7), ETR + ETP = $2ETP_0$, se met sous la forme,

$$ETR + ETP \leqslant (1 - a)Rg - Q_{4-5}. \qquad (I, 19)$$

Par ailleurs, si l'on désigne par ε le rapport ETR/ETP,

$$\varepsilon = \frac{ETR}{ETP} \qquad (I, 20)$$

ε a le sens d'un indice d'évapotranspiration relative égal à un pour les régions où ETR = ETP et égal à zéro pour les zones désertiques.

L'équation (I, 19) permet alors d'exprimer respectivement ETP et ETR :

$$ETP \leqslant \frac{(1 - a)Rg - Q_{4-5}}{1 + \varepsilon} \qquad (I, 21)$$

et

$$ETR \leqslant \frac{\varepsilon[(1 - a)Rg - Q_{4-5}]}{1 + \varepsilon} \qquad (I, 22)$$

III. — Discussion

L'évapotranspiration potentielle est donc évaluable de deux manières différentes sur des périodes multiples de 24 heures, sans changement de température :

— soit, dans certains cas, à partir du rayonnement net de grande longueur d'onde ($\sigma' T_4 - R'a$) ; celui-ci intégrant par l'intermédiaire de la température, les effets d'oasis de grande échelle (Q_{4-5}).

— soit à partir du rayonnement global absorbé $(1 - a)Rg$, des effets d'oasis de grande échelle (Q_{4-5}) et d'un indice ε d'évapotranspiration relative.

On constate que ETP ne peut pas se définir uniquement en fonction des facteurs énergétiques ; dans le premier cas, le rayonnement net de grande longueur d'onde est fonction de l'humidité de l'air, donc dans une certaine mesure, des phénomènes d'évaporation. Dans le deuxième cas, ε traduit également les conditions d'alimentation en eau du système. Il est difficile de relier ETP aux seuls facteurs énergétiques quand les conditions d'alimentation en eau sont susceptibles de varier au cours du temps.

Cependant, il est possible d'étudier deux cas limites :

— Quand $\varepsilon = 1$, c'est-à-dire :

$$ETR = ETP$$

on a :

$$ETR \textit{ ou } ETP \leqslant 0{,}5\,[(1 - a)\,Rg + Q_{4-5}]$$

Si $Q_{4-5} = 0$, il vient,

$$ETR \textit{ ou } ETP \leqslant 0{,}5\,(1 - a)\,Rg.$$

— Quand $\varepsilon = 0$,

$$ETR = 0$$

donne,

$$ETP \leqslant (1 - a)\,Rg + Q_{4-5}$$

Si $Q_{4-5} = 0$, on a :

$$ETP \leqslant (1 - a)\,Rg.$$

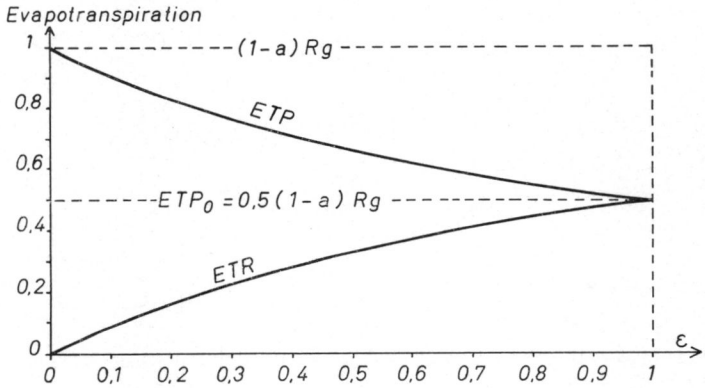


Fig. 3. — *Variation relative de ETR et ETP d'échelle climatique en fonction de l'évapotranspiration relative* $\varepsilon = ETR/ETP$

La figure a été faite dans le cas où les effets d'oasis de grande échelle Q_{4-5} sont nuls.

L'évapotranspiration potentielle ETP varie donc entre deux valeurs limites de $2ETP_0 = (1 - a)Rg + Q_{4-5}$ à $ETP_0 = 0{,}5(Rg + Q_{4-5})$ quand ETR varie de zéro à ETP_0. La figure 3 donne la variation de ETR et ETP en fonction du rapport ε dans le cas où les effets d'oasis de grande échelle sont négligeables. Dans le cas contraire, selon qu'ils correspondraient à des apports ou à des pertes d'énergie, ils augmenteraient ou diminueraient artificiellement la valeur du rayonnement global absorbé, le sens du phénomène serait le même.

Ainsi, pour les zones équatoriales au couvert végétal très abondant et aux pluies régulièrement supérieures à ETP, on peut admettre que $\varepsilon = 1$, c'est-à-dire que ETP ou ETR doit être inférieure ou égale à $0{,}5(1 - a)Rg$ en l'absence d'effet d'oasis. Le tableau (2) tiré des données fournies par L. Turc montre que les bilans hydriques de ces régions font ressortir une ETP ou ETR annuelle de l'ordre de la moitié du rayonnement global susceptible d'être absorbé par un feuillage abondant généralement mouillé.

TABLEAU 2

Évapotranspiration réelle (ETR) en zone équatoriale

Cours d'eau, avec éventuellement la surface du bassin versant et la période sur laquelle porte le bilan	Pluies en mm	$\bar{\theta}$°C	ETR en mm
a) Java			
Tji Anten (240 km²) 17 ans	4 935	21°	1 188
Tji Kapundung	2 650	18°	1 070
b) Amérique du Sud			
Amazone (bilan mal connu)	1 900	24°5	1 245
c) Afrique			
Congo (bilan mal connu)	1 400	22°5	1 030
Sanaga à Edea	1 610	23°	1 095

		Albédo	
		5 %	10 %
		(mm)	(mm)
Rayonnement global	350	1 040	990
	400	1 190	1 130
Moyenne annuelle exprimée en cal cm² jour⁻¹	450	1 340	1 270

Les valeurs maximales théoriques de ETR annuelle ont été calculées à partir de l'égalité ETR = ETP = $ETP_0 \leqslant 0{,}5(1 - a)Rg \times 365$.

Les albédos 5 et 10 % peuvent correspondre à ceux d'une forêt dense au feuillage humide.

Les valeurs observées comprises entre 1 030 et 1 245 mm correspondent bien aux valeurs théoriques comprises entre 990 et 1 340 mm déduites de l'inégalité ETP, $\leqslant 0{,}5(1 - a)Rg$.

La même conclusion serait valable pour les étendues d'eau très importantes telles que les mers. Toutefois, au voisinage des côtes, on devra tenir compte des perturbations introduites par les évaporations et les « volants calorifiques » différents de la terre et de la mer qui produisent systématiquement des effets d'oasis sous forme de brise de mer et de terre d'échelle égale ou supérieure à e_3. Ces échanges latéraux sont encore accrus au voisinage des côtes désertiques.

Si l'on considère une zone fortement arrosée telle qu'une très vaste oasis dans un désert, on peut admettre qu'en bordure, on se trouve dans les conditions de climat désertique ETR = 0, alors qu'au centre ETR = ETP. Ainsi, en allant du bord du dispositif au centre, on peut justifier à partir des équations précédentes une variation du simple au double de l'ETP, toutes autres conditions restant égales, selon l'importance de l'anneau de garde placé autour de lui pour uniformiser les conditions. Si les inégalités précédentes ne donnent pas la variation de ETP en fonction des distances du périmètre considéré, elles permettent d'en définir les limites supérieures et inférieures et de retrouver par une voie toute différente, les courbes de SUTTON, reprises par CALDER, DUFFEL et LATTAN sur la réduction de ETP en fonction de l'anneau de garde (fig. 4).

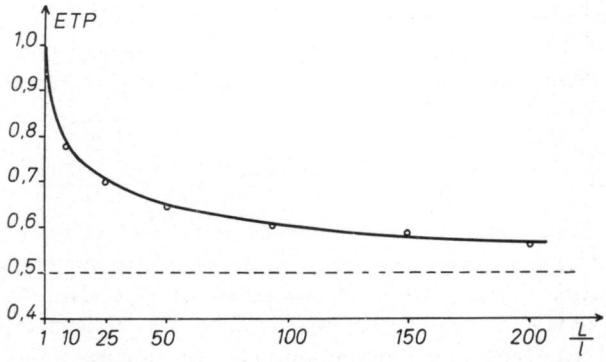


FIG. 4. — *Variation relative de ETP en fonction des dimensions de l'anneau de garde L, placé autour de la zone de mesure de dimensions l, pour uniformiser les conditions de milieu* (DEACON, PRIESTLEY et SWINBANK, 1958).

On notera que dans une région de polyculture, les ETR sont très différentes d'un champ à l'autre. Il en résulte que les ETP seront elles-mêmes différentes ; mais les effets d'oasis auront pour effet de tendre à les uniformiser, certaines zones servant de sources relativement chaudes, d'autres de sources relativement froides. Selon l'importance des surfaces, les effets d'oasis relèveront d'échelles différentes. ETP ne correspondra plus qu'à une valeur moyenne, valable à une échelle supérieure à celle de la turbulence, qui ne traduira pas les ETP des surfaces plus réduites puisqu'il correspondra à l'ETR moyenne de la même zone et non pas à l'ETR de chaque champ. Cependant, à une échelle inférieure à celle de la turbulence, il sera possible de définir une ETP locale, très variable d'un point à un autre, par exemple du bord d'un champ à son centre. On en verra tout l'intérêt agronomique dans le 4e chapitre.

L'ensemble des équations qui précèdent suppose que lorsqu'on passe de ETP à ETR, la transformation se fait sans perturber le climat antérieur. Ce raisonnement n'est valable qu'à la limite et sera d'autant plus éloigné de la réalité que le rapport

ε entre ETR et ETP variera rapidement dans le temps ou que sa zone d'uniformité possédera des dimensions éloignées de celles correspondant à l'échelle qui définit le climat. Cependant, si l'on considère une zone uniforme suffisamment étendue, ces équations permettent de définir les limites de variation possible de ETR ou ETP tout en les reliant aux différents termes du bilan (R*g*, rayonnement net de grande longueur d'onde).

On verra dans les chapitres suivants que l'amélioration de la production agricole doit être recherchée dans un abaissement de ETP sans perdre sur le facteur lumière. Il ressort des équations proposées, notamment (I, 19), que le seul moyen à grande échelle est d'agir sur ETR, soit en mobilisant mieux les réserves en eau du sol, soit en irriguant. L'apport d'eau a donc non seulement pour effet de mettre la plante dans les meilleures conditions de vie, mais également d'abaisser ETP en agissant sur ETR. Cet abaissement de ETP, toutes autres conditions restant égales, sera d'autant plus marqué que la surface traitée sera importante. Cependant, on constate que pour considérer, dans une région très aride, ETR comme non négligeable, il faudra irriguer des surfaces très importantes d'échelle bien supérieure à e_2. Il s'agira donc de surfaces correspondant au moins à plusieurs km² (quelques centaines d'hectares). Dans ce cas, il sera possible d'abaisser ETP et lorsque l'échelle des surfaces croîtra, on pourra envisager à la limite, d'arriver à diviser ETP par deux. Cette diminution de ETP pour des échelles importantes correspond non seulement à une diminution de l'eau consommée, mais également à une amélioration importante de son efficience.

Conclusion

L'étude du bilan d'énergie d'une région uniforme (sol, couvert végétal, alimentation en eau) faite sur une période de 24 h, permet d'établir des relations simples entre les évapotranspirations réelle et potentielle et les termes du bilan d'énergie (R*g*, rayonnement net de grande longueur d'onde). Ces relations ont été établies avec une série d'hypothèses que l'on ne rencontre généralement pas dans les conditions naturelles ; elles fournissent cependant une approche de ETR et de ETP et font ressortir le rôle joué par le rayonnement global absorbé ; elles montrent que ETP, à cette échelle, a bien un sens climatique indépendant du couvert végétal ; celui-ci n'intervient que pour définir ETR. La compensation existant entre ETP et ETR, traduite par la relation simple ETP + ETR = constante pour un certain rayonnement global absorbé, permet d'expliquer les variations de ETP à partir de celles de ETR. On peut alors avoir une indication de l'ordre de grandeur des modifications climatiques que l'on peut attendre d'un changement de couvert végétal ou d'un apport d'eau par irrigation. Les limites données aux variations de ETP seront utilisées dans le 4e chapitre car elles commanderont non seulement les besoins en eau du couvert végétal mais également l'efficience de l'eau consommée.

Deuxième chapitre

ÉVAPOTRANSPIRATIONS POTENTIELLE ET RÉELLE AU NIVEAU DE LA FEUILLE. RELATIONS AVEC LA PHOTOSYNTHÈSE

Introduction

Dans le premier chapitre, l'étude du bilan énergétique envisagé sur des surfaces présentant un caractère d'uniformité sur plusieurs dizaines d'hectares au minimum avait conduit à définir les évapotranspirations potentielle (ETP) et réelle (ETR) presque uniquement en fonction des facteurs climatiques et notamment du rayonnement global. ETP résultait d'un équilibre entre l'eau évapotranspirée et l'énergie disponible à cet effet comme facteur limitant tandis que ETR correspondait à un équilibre entre l'énergie consommée et l'eau jouant alors le rôle de facteur limitant ; la plante n'intervenait plus que par son albédo dans le bilan d'énergie et les termes ETP ou ETR avaient une signification directement climatique indépendante du type de couvert végétal.

On se propose dans ce chapitre d'examiner ces notions d'ETP et d'ETR au niveau d'une feuille, celle-ci devant constituer en quelque sorte l'unité élémentaire pour établir des relations entre la circulation de l'eau et la production de matière sèche. L'étude à cette échelle sera faite également sous l'angle du milieu extérieur en utilisant pour la détermination de la transpiration la méthode du bilan d'énergie. On rappellera succintement les lois physiques indispensables à la compréhension des phénomènes et on analysera le rôle des différents facteurs climatiques (température, humidité de l'air, vent, rayonnement). Cette étude permettra de juger l'intérêt des méthodes physiques d'évaluation de la transpiration des végétaux et d'indiquer les corrections à introduire ou les précautions à prendre. Enfin, elle fera ressortir les conditions microclimatiques très particulières dans lesquelles s'effectuent les réactions biochimiques. On insistera sur le rôle essentiel, dans ces phénomènes, de la régulation stomatique et cuticulaire qui n'apparaissait pas dans le chapitre précédent. Par l'intermédiaire de cette double régulation, il sera possible de relier indirectement les phénomènes de transpiration à l'activité photosynthétique, c'est-à-dire au niveau de production quantitative de matière sèche et même, éventuellement, à la qualité de celle-ci. L'évapotranspiration potentielle instantanée

apparaîtra comme un facteur limitant possible de la production de matière sèche.

On disposera alors des éléments nécessaires pour envisager de faire une interprétation synthétique de ces phénomènes à l'échelle de la plante entière, puis dans le cadre agronomique d'un ensemble végétatif. Les conclusions tirées à petite échelle pourront être utilisées dans le 4e chapitre pour envisager les possibilités d'action en vue de modifier le climat et les microclimats dans un sens favorable à la production agricole, compte tenu des limites possibles définies dans le 1er chapitre.

I. — La couche limite

L'étude du bilan d'énergie ou des échanges gazeux au niveau d'un organe végétal tel qu'une feuille, fait obligatoirement intervenir la couche limite qui enveloppe tous les corps baignant dans un fluide. Sans entrer dans les théories assez complexes qui ont pu être établies au sujet de cette couche limite, nous indiquerons toutefois sa définition et les principales lois qui peuvent aider à la compréhension des calculs que l'on va développer. Les phénomènes liés à la couche limite intéressent aussi bien l'aérodynamicien pour des études sur les fusées ou les avions que le thermodynamicien pour des calculs d'échangeur de température. Nous introduirons donc dans ces données un certain nombre de simplifications que l'on s'attachera à justifier, étant donné le cadre limité dans lequel s'inscrit cette étude (Sutton, 1953 ; Brun, 1955 ; Schlichting, 1958).

a) *Définition*

Si un corps baigne dans un fluide caractérisé par des variables de tension uniformes en moyenne durant un certain temps (ex. vitesse, température, pression partielle de vapeur), il existe autour de ce corps des régions où ces variables de tension du fluide sont affectées par sa présence et par les échanges qu'il peut avoir avec le milieu extérieur. Cette couche de fluide perturbée qui enveloppe le solide se désigne sous le terme de couche limite.

On définit ainsi pour chaque variable une couche limite. En dehors de celle relative à la vitesse du fluide (couche dynamique), on s'intéressera plus particulièrement aux couches limites relatives aux échanges de chaleur, à la diffusion de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de l'oxygène.

Les échanges thermiques ou gazeux ont donc lieu par l'intermédiaire de ces couches limites entre le corps considéré et le milieu extérieur défini par les facteurs climatiques.

La plupart des échanges que l'on étudie concernent des feuilles généralement planes. Pour simplifier l'approche du problème, on envisagera d'abord le cas d'une surface plane lisse à bord d'attaque franc et d'épaisseur négligeable.

b) *Propriétés de la couche limite dynamique (laminaire)*

Soit U_0 la vitesse du fluide libre, parallèle à la surface en dehors de la zone perturbée ; cette dernière va se développer autour de la plaque comme il est indiqué fig. 5. Sur toute la surface de la plaque la vitesse est nulle, par contre, elle est égale à U_0 à une distance très éloignée de la plaque. On peut convenir de définir la couche limite comme la zone où la vitesse du fluide est inférieure ou égale à 0,99 U_0. Cette couche, d'épaisseur nulle au bord d'attaque, va en augmentant d'épaisseur quand on s'éloigne.

Le profil des vitesses sur une verticale à la plaque présente 2 types de courbe selon la distance au bord d'attaque comme le montre la fig. 6 correspondant aux points P_1 et P_2 de la fig. 5.

On distingue donc le long de la plaque, trois zones :

— une zone proche du bord d'attaque où la couche est purement laminaire, c'est-à-dire dans laquelle les filets fluides s'écoulent parallèlement les uns par rapport aux autres sans interpénétration ;

— une zone de transition où commence à s'établir par le bord externe de la couche limite un noyau turbulent ;

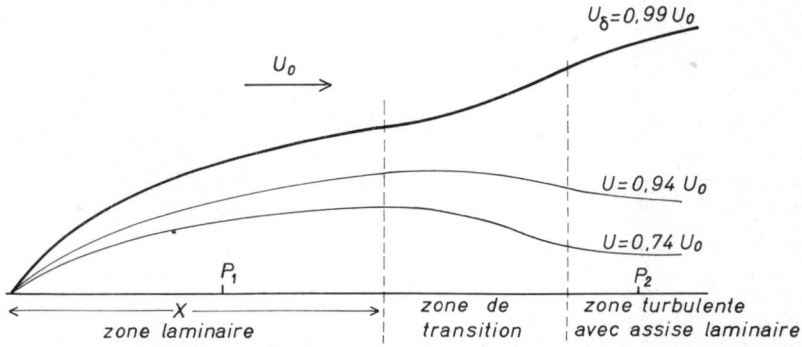


FIG. 5. — *Développement vertical de la zone perturbée des vitesses du vent (couche limite dynamique) au-dessus d'une plaque plane en fonction de la distance au bord d'attaque.*
U_0 vitesse du fluide libre — lignes d'isovitesse (U_δ = 0,99 U_0; 0,94 U_0; 0,74 U_0).

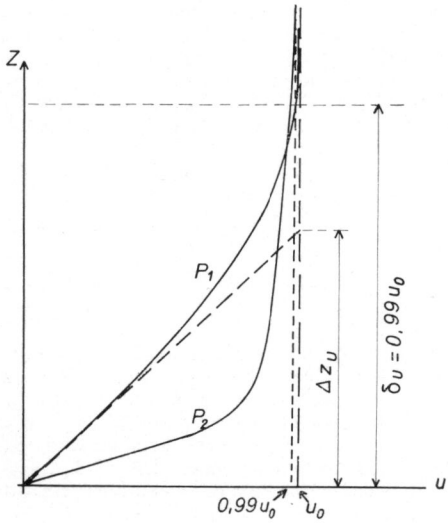


FIG. 6. — *Profil des vitesses de l'air U, dans la couche limite aux points P_1 et P_2 de la fig. 5 (P_1 zone laminaire — P_2 zone turbulente)*
δ_u épaisseur de la couche limite dynamique au point P_1, correspondant à la ligne d'iso-vitesse $U\delta$ = 0,99 U_0.
Δz_u épaisseur de la couche limite équivalente.

— une zone où une mince couche laminaire est surmontée d'une couche turbulente qui s'accroît plus vite que dans la première zone et dans laquelle les filets fluides s'interpénètrent, dite couche limite turbulente.

La distance x, à partir du bord d'attaque sur laquelle le mouvement est purement laminaire (fig. 5), est donnée expérimentalement à partir du nombre de Reynolds et certaines caractéristiques du fluide.

$$\mathcal{R}_x = \frac{U_0 \cdot x}{\gamma} \qquad \text{(II, 1) *}$$

U_0 Vitesse du fluide libre

γ Viscosité cinématique.

* Le chiffre romain II correspond au numéro du chapitre.

Le nombre de Reynolds critique relatif à l'apparition de la zone de transition à une distance X du bord d'attaque varie de 10^5 à $50 . 10^5$. On retiendra ce premier chiffre valable pour les mouvements fluides fortement perturbés, afin de se placer dans les conditions les plus sévères d'une feuille agitée dans un courant d'air qui ne lui est pas parallèle ; l'application numérique de la formule (II, 1), pour de l'air animé d'une vitesse de un mètre par seconde, conduit à $x = 150$ cm. Ainsi, la couche limite turbulente n'apparaîtrait, dans le cas d'une surface plane lisse dans de l'air perturbé, qu'à 1,50 m du bord d'attaque.

Certes une feuille est loin de présenter les caractères de rigidité d'une plaque plane et lisse. Son mouvement relatif par rapport aux filets d'air peut être beaucoup plus rapide que ne le laisse supposer une vitesse du vent moyenne relevée avec des appareils météréologiques. Cependant, les ordres de grandeur donnés par le nombre de Reynolds critique sont tels que l'on peut admettre que dans la majorité des cas, les organes végétaux (feuilles, fleurs), même les plus exposés au vent, sont enveloppés d'une couche limite pour laquelle l'essentiel des phénomènes est laminaire.

Cette simplification importante pour l'étude de nos problèmes est évidemment encore plus valable pour les feuilles situées dans la masse végétale.

Dans la suite du texte, on ne traitera donc le problème de la couche limite que dans le cadre d'un mouvement laminaire.

Les principales lois qui seront utiles pour étudier les échanges de chaleur ou de gaz de la feuille avec le milieu extérieur sont relatives aux profils des variables de tension et aux épaisseurs des différentes couches limites (couche limite thermique, couche limite de diffusion de vapeur, de gaz carbonique ou d'oxygène).

La loi de distribution des vitesses est donnée par les fig. 5 et 6. Les lois de distribution des températures ou des pressions partielles ont, par analogie, le même profil entre les valeurs aux bornes sur la paroi et sur le bord extérieur de la couche limite considérée.

L'épaisseur δ_u de la couche limite dynamique, dans le cas d'une plaque plane, varie selon la loi suivante (équation II, 2) en fonction de la distance x au bord d'attaque et en admettant une affinité dans la distribution des vitesses aux différents points de la plaque.

$$\delta_u = 4{,}92 \sqrt{\frac{x \cdot \gamma}{U_0}} \qquad \text{(II, 2)}$$

ou

$$\frac{\delta_u}{x} = \frac{4{,}92}{\mathcal{R}_x^{1/2}}. \qquad \text{(II, 3)}$$

Ainsi, toutes autres conditions restant égales, la couche limite dynamique se développe selon une loi parabolique en fonction de la dimension du corps que l'on désignera par l et selon l'inverse de la racine carrée de la vitesse du vent prise parallèlement à cette surface.

La couche limite autour d'un pétale de fleur d'arbre fruitier ou d'une feuille de lin sera donc, dans les mêmes conditions de ventilation, d'un ordre inférieur à celle qui enveloppe une feuille de betterave ou de maïs. On examinera ultérieurement les conséquences qui pourront en découler quant aux équilibres qui s'établissent en fonction des conditions climatiques.

c) *Propriétés des couches limites thermiques et de diffusion gazeuse. Coefficients d'échange*

Pour l'étude des couches limites relatives à la température et à la diffusion de la vapeur d'eau on devra admettre une nouvelle simplification. On supposera la surface isotherme; il en résulte que le flux de chaleur ou de vapeur va varier d'un point à l'autre de la plaque considérée. Comme dans le cas de la couche dynamique, on admet que le fluide a des propriétés physiques constantes et que le mouvement est laminaire. En outre, on suppose que les différences de densité résultant des écarts de température ou de pression partielle de vapeur d'eau n'entraînent pas de mouvements de gravitation importants par rapport à la vitesse U_0 du fluide libre, c'est-à-dire que la convection naturelle est négligeable devant la convection forcée. Cette hypothèse est sans doute moins justifiée quand U_0 devient très faible comme dans la masse d'un couvert végétal. Cependant, les écarts de température dans ce dernier cas sont réduits et contribuent à diminuer l'ampleur de cette convection naturelle. Enfin, le facteur de thermodiffusion est négligé (BERNARD, 1956).

L'enveloppe de la couche limite thermique d'épaisseur δ_θ est alors également une parabole donnée par l'équation

$$\frac{\delta_\theta}{x} = B \cdot \mathcal{R}^{-1/2} \qquad \text{(II, 4)}$$

B étant une fonction du nombre de Prandlt $\left(P = \frac{\nu \cdot c \cdot \rho}{k}\right)$ (soit 0,74 pour l'air). $c \cdot \rho$. désignant la chaleur spécifique de l'air et k le coefficient de conductivité moléculaire de la chaleur pour l'air sec. En première approximation $B = 4{,}92 \cdot P^{-1/3}$
d'où

$$\delta\theta = 4{,}92 \cdot \mathcal{R}_x^{-1/2} \cdot \mathcal{P}^{-1/3}. \qquad \text{(II, 5)}$$

Le profil de température est analogue au profil des vitesses. Il est alors possible d'en déduire le flux de chaleur en chaque point d'abscisse x de la paroi pour $z = 0$.

$$\text{flux} = K\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_{z=0}. \qquad \text{(II, 6)}$$

K étant le coefficient de conductibilité thermique et z l'axe perpendiculaire à la plaque.

Le flux de chaleur peut être également exprimé en fonction des écarts de température entre la paroi et l'air et d'un coefficient local de convection égal à :

$$\frac{\text{flux}}{\theta_{z=0} - \theta_{z=\delta}} = 0{,}332 \cdot \frac{K}{x} \cdot \mathcal{R}_x^{1/2} \cdot \mathcal{P}^{1/3} \qquad \text{(II, 7)}$$

Connaissant la loi de développement de $\delta\theta$ en fonction de x, on en déduit un coefficient moyen pour l'ensemble de la plaque. Il est égal au double du coefficient local correspondant à la longueur de la plaque.

$$\text{coefficient plaque} = 0{,}664 \cdot \frac{K}{l} \cdot \mathcal{R}_x^{1/2} \cdot \mathcal{P}^{1/3} \qquad \text{(II, 8)}$$

Ce coefficient de plaque définissant le flux de chaleur en fonction de l'écart de température entre la surface et le milieu extérieur constitue un cas particulier du coefficient de forme et de dimension que l'on désignera ultérieurement par $C_\theta(l^{-1/2}, U^{1/2})$. Ce coefficient permettra d'évaluer les échanges de chaleur avec l'extérieur d'un corps de forme et de dimension quelconque (l) en fonction des valeurs aux bornes des températures ($\theta_{z=0}$, $\theta_{z=\delta}$).

Les caractéristiques des couches limites relatives à la vapeur d'eau, au gaz carbonique ou à l'oxygène se déduisent immédiatement par analogie.

Pour chacune d'elle, on retrouve la loi parabolique (variation de l'épaisseur en fonction de la racine carrée de la distance au bord d'attaque et de l'inverse de la racine carrée de la vitesse du vent) et les différents coefficients d'échange.

Le rapport entre les épaisseurs des différentes couches limites est constant puisqu'il dépend du rapport des caractéristiques du fluide vis-à-vis des variables considérées : viscosité cinématique pour le vent (γ), diffusivité thermique pour la tempérautre $\frac{K}{c \cdot \rho}$, diffusivité de la vapeur d'eau (D), du gaz carbonique (D_p) ou de l'oxygène (D_{O_2}).

On a donc :

$$\frac{\delta_u}{\delta_\theta} = \mathcal{P}^{1/3} = \left(\frac{\nu \cdot c \cdot \rho}{K}\right)^{1/3} \# 0{,}91. \qquad \text{(II, 9)}$$

La couche limite thermique dans l'air est plus épaisse que la couche limite dynamique. De même, on a, à la température de zéro degré :

$$\left(\frac{\delta_f}{\delta_\theta}\right)_{0^\circ} = \left(\frac{D \cdot c \cdot \rho}{K}\right)^{1/3} = \left(\frac{0{,}239}{0{,}170}\right)^{1/3} \# 1{,}12. \qquad \text{(II, 10)}$$

La couche limite relative à la vapeur δ_f est plus épaisse que la couche limite thermique δ_θ.

Par analogie, on a ;

$$\left(\frac{\delta_p}{\delta_f}\right)_{0^\circ} = \left(\frac{0{,}139}{0{,}239}\right)^{1/3} \# 0{,}85 \qquad \text{(II, 11)}$$

$$\left(\frac{\delta_0}{\delta_p}\right)_{0^\circ} = \left(\frac{0{,}178}{0{,}239}\right)^{1/3} \# 0{,}91. \qquad \text{(II, 12)}$$

Les couches limites qui dépendent de la dimension du corps et de la vitesse du vent se classent donc par ordre croissant de la manière suivante

$$\delta_u < \delta_p < \delta_\theta < \delta_0 < \delta_f.$$

On remarque toutefois que les écarts extrêmes sont assez faibles, de l'ordre de 20 p. 100. Dans de nombreux cas, on pourra admettre que les couches limites sont identiques et intégrer l'erreur systématique dans un coefficient expérimental.

Quand on passe d'une plaque plane et lisse à des corps de formes diverses, plus ou moins rugueux, la couche limite se modifie dans ses dimensions et dans sa structure. Ainsi, lorsque la hauteur des aspérités est supérieure au 1/3 de la couche limite laminaire, on ne peut plus parler d'écoulement hydrodynamiquement lisse ; lorsque l'aspérité dépasse 80 fois la couche limite laminaire, celle-ci disparaît totalement au profit de la couche limite turbulente qui la surmonte. Ainsi, le système pileux d'une feuille contribuera à perturber fortement la couche limite laminaire. Finalement, tout se passera comme si la couche limite augmentait d'épaisseur.

Malgré toutes les hypothèses introduites et toutes les simplifications qui ont dû être faites, la notion de couche limite laminaire mérite d'être retenue pour l'étude des échanges d'un organe végétal avec le milieu extérieur, car elle conduit à des équations simples qui permettent l'interprétation de phénomènes complexes. Ainsi, malgré les modifications qui peuvent intervenir dans la dimension ou la structure de la couche limite en fonction du rayon de courbure de l'objet, de sa rugosité, des perturbations du fluide, il sera toujours possible d'ajuster les lois de variation à chaque cas particulier en déterminant par voie expérimentale un coefficient de forme et de dimension. A ce coefficient près, la proportionnalité des différentes couches limites, l'analogie des profils, la variation avec la dimension et avec la vitesse du vent subsistent. Cette permanence va permettre l'analyse de l'influence des différents facteurs du milieu.

II. — Évapotranspirations réelle et potentielle

a) *Définitions*

Nous avons convenu par définition de désigner sous le nom d'évapotranspiration potentielle, l'évapotranspiration correspondant à l'énergie seul facteur limitant. Dans le cas de l'échelle réduite que l'on considère, ce sera l'évaporation d'une surface d'eau libre, car l'eau ne peut pas être alors le facteur limitant. Cette évapotranspiration potentielle est toutefois définie à l'albédo près, albédo variable d'ailleurs avec la hauteur du soleil. De même, une pastille d'évaporomètre Piche placée à l'air libre définit bien, à sa propre échelle, tant qu'elle est imbibée d'eau, l'évapotranspiration potentielle, mais celle-ci varie évidemment avec l'albédo, donc avec la couleur de la pastille. On remarque immédiatement que cette évapotranspiration potentielle que l'on appellera ponctuelle va dépendre de la dimension, de la forme du corps considéré et de sa rugosité, puisque la couche limite sera fonction de ces variables. On ne peut donc pas, à échelle fine, définir ETP indépendamment des caractéristiques du corps considéré (dimensions l, forme, rugosité, albédo).

On sait que, lorsque les stomates d'une feuille sont très ouverts, la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dans les chambres stomatiques, dans le canal stomatique et dans la zone de diffusion divergente à la sortie du stomate, est négligeable vis-à-vis de la résistance à la diffusion dans la couche limite laminaire (Bange, 1953,

MILTHORPE, 1962, de PARCEVAUX, 1963). Il en résulte que, lorsqu'une feuille présente des stomates largement ouverts, la diffusion de vapeur d'origine stomatique et cuticulaire est sensiblement la même que celle d'une surface liquide ayant le même albédo et la même couche limite, c'est-à-dire la même forme et la même dimension. Dans ces conditions, la feuille transpire une quantité d'eau sensiblement égale à ETP ponctuelle. Évidemment, ETP dépend de l'albédo de la feuille qui intervient pour définir l'énergie disponible.

En conclusion, l'évapotranspiration potentielle à très petite échelle correspond à la transpiration d'une feuille aux stomates très largement ouverts. Cette évapotranspiration potentielle ponctuelle, fonction des facteurs du milieu, dépend, à l'albédo près, du coefficient de forme et de dimension de l'organe considéré.

Lorsque les stomates se ferment, la résistance à la diffusion de la vapeur offerte par le canal stomatique augmente et réduit la transpiration stomatique. Quand les stomates sont fermés, il ne reste plus que la transpiration cuticulaire qui varie en fonction de l'état des parois. Enfin, lorsque le flétrissement apparaît, la modification des cellules épidermiques, l'augmentation de la pression osmotique, abaissent encore la transpiration. L'ensemble de ces phénomènes, intervenant avec des ampleurs très variables selon les plantes et dans des conditions très diverses, a pour effet de faire varier la transpiration réelle entre ETP et une valeur nulle. Il est de même possible, indépendamment des phénomènes directs de rosée sur une paroi froide, de justifier à partir de ces mécanismes liés à des variations de pression de succion (D. P. D.) [1], une fixation directe de la vapeur d'eau de l'air même en dehors des zones désertiques.

A petite échelle, ETR résulte donc de l'intervention de la régulation stomatique, de la variation de la transpiration cuticulaire par suite de modifications de la structure des parois cellulaires et même de la pression de succion (D. P. D.).

Cependant, la diminution de la transpiration résultant des phénomènes physiologiques (régulation stomatique et cuticulaire, variation D. P. D.) entraîne une modification de la température d'équilibre pour des conditions de milieu pourtant identiques. La transpiration réelle se trouve donc également affectée par ce changement de température de surface résultant des phénomènes physiologiques.

On conviendra d'écrire de manière générale, comme dans le premier chapitre,

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon \mathrm{ETP}. \qquad \text{(II, 13)}$$

Mais pour séparer, à cette échelle, les différentes causes de réduction de ETR par rapport à ETP, on posera,

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_{\varphi} \cdot \varepsilon_{He} \cdot \varepsilon_{\theta}} \qquad \text{(II, 14)}$$

— ε_{φ} désigne la réduction de ETR par rapport à ETP pour une même température de surface. il correspond au facteur de réduction de ETR qui ne fait intervenir que la régulation stomatique et cuticulaire par l'intermédiaire des parois de la surface ; il traduit l'augmentation des résistances à la circulation de l'eau. ε_{φ} varie de 0 à 1 et comprend d'une part, la transpiration cuticulaire qui ne représente généralement que 10 à 20 p. 100 de l'ETR totale quand les stomates sont très ouverts,

[1] Déduit de l'expression anglaise « Diffusion pressure deficit ».

la transpiration stomatique représentant le complément. Quand la régulation stomatique intervient, la transpiration cuticulaire diminue également, mais moins vite que la transpiration stomatique ; elle prend alors une part prépondérante jusqu'à devenir la seule transpiration quand les stomates sont fermés.

— ε_{He} désigne une fonction inférieure ou égale à un qui dépend de l'humidité relative de lair (He) en équilibre avec la surface évaporante (abaissement de la tension de vapeur en équilibre sur les solutions salines : lois de RAOULT). Dans le cas de l'eau pure $He = 1$ et $\varepsilon_{He} = 1$. On remarque que pour un suc cellulaire même situé au point de flétrissement, on a encore $(He)_{0°} = 0{,}98$ ou $(He)_{20°} = 0{,}989$. Le DPD correspondant étant égal à 15 atmosphères ou $P_F = 4{,}2$ à 20°.

Ainsi, dans la plupart des problèmes agronomiques où l'on considère la plante dans un état de non-flétrissement, He sera très voisin de 1 et ε_{He} pourra être pris comme égal à un.

— ε_θ désigne l'augmentation relative de transpiration qui résulte de l'augmentation de température à la suite de l'intervention de la régulation stomatique et cuticulaire qui abaisse cette même transpiration par rapport à ETP initiale. ε_θ est donc supérieur ou égal à un. ε_θ résulte de l'action de ε_φ et ε_{He} qui, en réduisant ETR, modifie le bilan énergétique et par suite la température de surface.

Finalement, on constate qu'à l'échelle fine où l'on se place, dans ce chapitre, les phénomènes physiologiques (régulation stomatique, régulation cuticulaire, D. P. D.) vont prendre une place déterminante.

On remarque également que ETR ponctuelle comme ETP ponctuelle ne peuvent pas se définir en fonction des conditions de milieu, indépendamment de l'albédo et d'un coefficient de forme et de dimension.

b) *Bilan d'énergie*

On considérera, pour simplifier le bilan d'énergie, une seule face d'une feuille supposée plane. Celle-ci présente souvent des phénomènes de transpiration et de régulation différents sur ses deux faces, voire hétérogènes sur une même face. Par ailleurs, les deux faces sont presque toujours dans des conditions de milieu dissemblables, notamment en ce qui concerne le rayonnement net. Il suffira pour l'ensemble de la feuille de faire la somme des deux faces, le flux de chaleur éventuel entre les deux côtés n'intervenant pas dans le bilan global. Les conclusions de l'analyse sur le bilan restent donc valables pour l'ensemble de la feuille.

Dans le premier chapitre, le bilan énergétique était envisagé sur une période de 24 h pour éliminer les phénomènes d'accumulation ou de restitution de chaleur au sein du système étudié. Au niveau de la feuille, on va cette fois, examiner un bilan instantané et admettre également qu'il n'y a pas réchauffement ou refroidissement. Le régime est donc permanent à l'instant considéré. Cette hypothèse est très valable pour les phénomènes physiologiques puisque la fermeture des stomates d'une feuille, bien que très variable, s'étale sur des périodes de l'ordre de plusieurs minutes. Par contre, le milieu climatique sous l'action de la turbulence naturelle et des variations du rayonnement global à la suite de passages nuageux, connaît de très larges fluctuations presque instantanées. Le bilan énergétique que l'on va définir ne traduira donc qu'un état moyen pendant une période de temps de l'ordre de quelques minutes.

Dans le cadre de ces hypothèses et en négligeant l'énergie consommée par la photosynthèse qui ne représente très généralement qu'un faible pourcentage de l'énergie mise en jeu par la transpiration végétale, on peut écrire selon le principe de la conservation de l'énergie,

Énergie cédée par la transpiration réelle + Énergie échangée par conduction-convection + Rayonnement net de la feuille = 0.

On conviendra, pour expliciter les différents termes du bilan en fonction des facteurs du milieu, de considérer comme positive, l'énergie reçue par la surface et comme négative, l'énergie perdue par celle-ci.

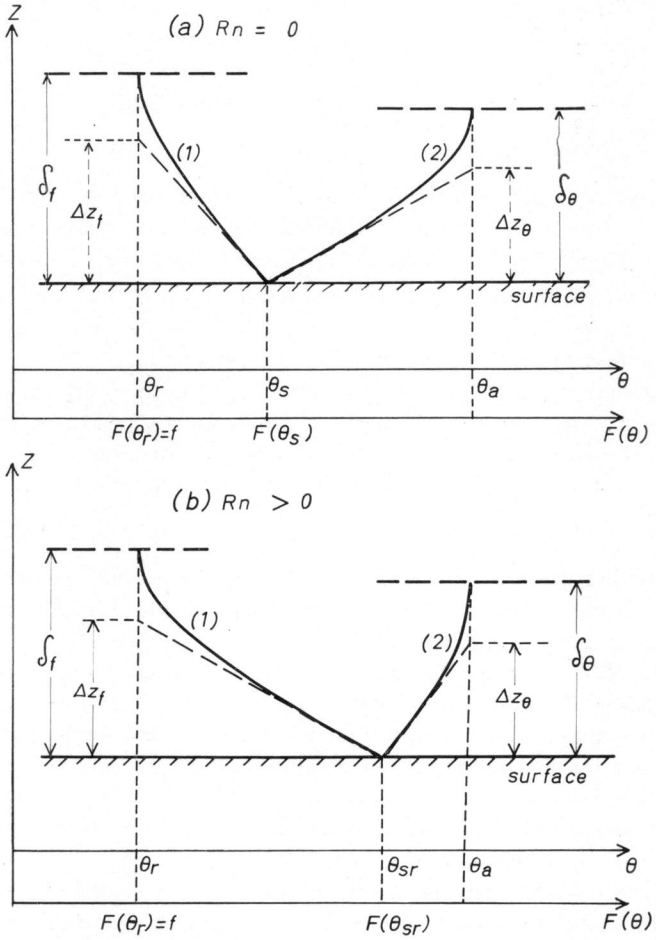


FIG. 7. — *Profils de température et de tension de vapeur dans les couches limites relatives à ces variables, au-dessus d'une surface évaporante*

a) Rayonnement net de la surface : nul.
b) Rayonnement net de la surface : positif.
(1) Transfert de vapeur par diffusion.
(2) Transfert de chaleur par conduction.
δ_f, δ_θ couches limites relatives à la vapeur d'eau et à la température
Δz_f Δz_θ couches limites équivalentes correspondantes

Désignons par (voir fig. 7).

δ_θ, δ_f, les épaisseurs des couches limites relatives à la température et à la vapeur d'eau ; elles dépendent notamment des coefficients de forme et de dimension du corps que l'on désignera par $C_\theta[l^{-1/2}, U^{1/2})]$ ou $C_f[l^{-1/2}, U^{1/2}]$

Δz_θ, Δz_f, les sous-tangentes aux profils de température et de tension de vapeur prises sur la surface.

On sait d'après les propriétés des couches limites et des phénomènes d'analogie que Δz_θ et Δz_f sont égaux sensiblement aux deux tiers de δ_θ et δ_f. On désignera Δz_θ et Δz_f sous le nom de couches limites laminaires équivalentes. Elles sont également fonction des coefficients de forme et de dimension C_θ, C_f et l'on peut écrire :

$$\Delta z_\theta = \Gamma_\theta[l^{1/2}, U^{-1/2}] \qquad \text{(II, 15)}$$

et

$$\Delta z_f = \Gamma_f[l^{1/2}, U^{-1/2}] \qquad \text{(II, 16)}$$

θ_a, θ_r, la température de l'air et le point de rosée au voisinage de la feuille en dehors de la couche limite. Ces températures peuvent évidemment être très différentes des données recueillies au même instant sous abri météorologique.

θ_s la température de la surface évaporante quand le rayonnement net est nul. Ce sera presque le cas d'une surface évaporante placée sous abri météorologique de manière à ne pas recevoir le rayonnement global.

θ_{sr} la température de la surface évaporante soumise à un rayonnement net différent de zéro. Ce rayonnement net est généralement positif le jour quand la température augmente, et négatif la nuit quand elle s'abaisse.

$F(\theta)$ la tension de vapeur saturante de l'air à la température θ.

$F'(\theta) = \dfrac{dF(\theta)}{d\theta}$, la dérivée de $F(\theta)$ par rapport à θ.

f la tension de vapeur de l'air. qui est égale à $F(\theta_r)$ en dehors de la couche limite.

K le coefficient de conductivité moléculaire de la chaleur pour l'air sec ($K = 0{,}58 \cdot 10^{-4}$ à 0° cal. cm^{-1}. s^{-1}.).

$c \cdot \rho$ la chaleur spécifique de l'air par unité de volume ($0{,}24 \times 1{,}293 = 0{,}31$).

D le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air ($D = 0{,}226$ à 0° en exprimant la vapeur d'eau en concentration ou $0{,}179 \cdot 10^{-5}$ g. cm^{-2}. s^{-1}. en exprimant les tensions de vapeurs en millibars.)

L la chaleur latente de vaporisation de l'air (597,3 cal. g^{-1} à 0°).

He l'humidité relative de l'air en équilibre avec une solution saline ou avec le D. P. D. de la surface évaporante de la feuille.

On peut représenter schématiquement les profils de température et de tension de vapeur dans les différents cas possibles. La figure 7 donne les profils dans les couches laminaires au-dessus d'une surface évaporante d'eau libre. La figure 8 indique les profils de tension de vapeur dans la couche limite relative à la vapeur pour trois cas simples et pour une même température de surface. On a donc dans ces conditions $\varepsilon_\theta = 1$. Les températures de surface étant identiques, les échanges d'énergie de la surface avec le milieu extérieur sont différents dans les trois cas puisque les ETR sont différents.

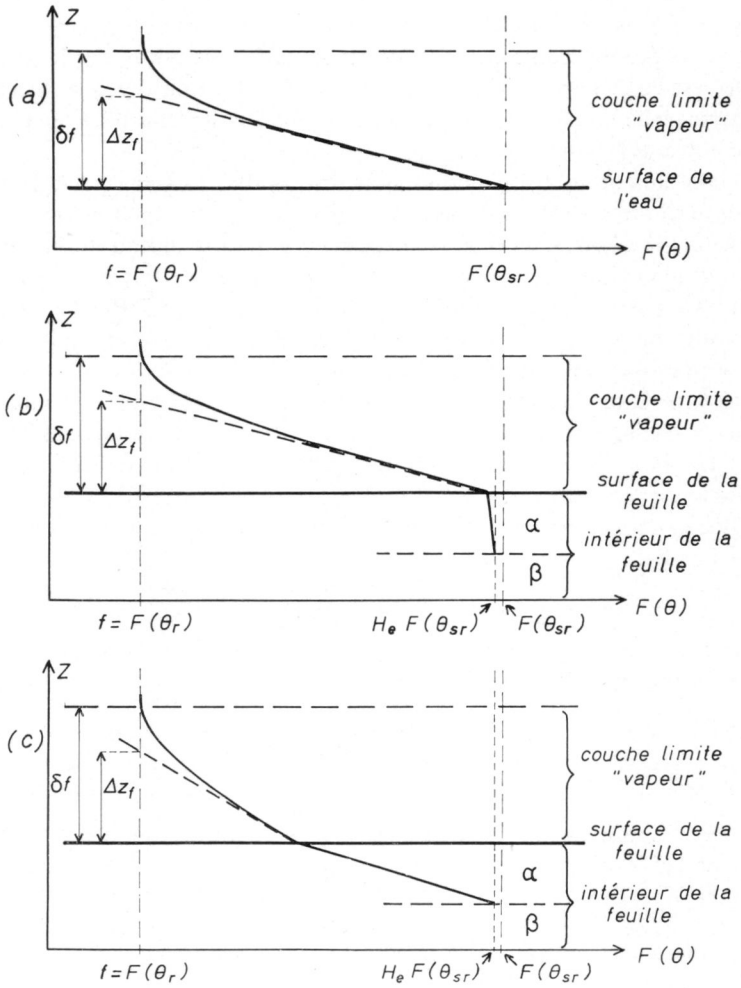


FIG. 8. — *Profils de tension de vapeur au-dessus de différentes surfaces évaporantes*
a) Surface d'eau libre.
b) Feuille aux stomates très largement ouverts.
c) Feuille présentant une certaine régulation stomatique et cuticulaire.

La coupe de la feuille est représentée schématiquement par 2 zones
α) Zone de transfert de vapeur à travers le canal stomatique ou zone de circulation de l'eau ou de la vapeur dans les cellules épidermiques et la cuticule. A ce gradient de tension de vapeur correspond un gradient du D. P. D. en phase liquide.
β) Intérieur de la feuille.
L'échelle des hauteurs n'est pas respectée sur la figure ; Δz_f épaisseur de la couche limite, est de l'ordre du mm (1 000 μ) alors que la zone α de l'intérieur de la feuille va de quelques μ à 10 ou 20 μ. On remarque que lorsque ETR est inférieure à ETP, la zone α de la feuille est soumise à un très fort gradient de D. P. D. ou de tension de vapeur.

On a donc :

a) Surface d'eau libre. L'évaporation correspond par définition à ETP.

b) Feuille aux stomates nombreux et largement ouverts. La résistance à la diffusion est négligeable au niveau des stomates. La tension de vapeur à la sortie

du stomate est très voisine de $He \cdot F(\theta_{sr})$. Étant donné la proximité des stomates entre eux (quelques dizaines de μ) par rapport à l'épaisseur de la couche limite équivalente (de l'ordre du mm), la tension de vapeur, influencée par la transpiration cuticulaire, est également voisine de $He \cdot F(\theta_{sr})$. Sur toute la surface de la feuille la transpiration réelle ETR est semblable à l'évaporation de l'eau libre ; elle correspond pratiquement à ETP, car $\varepsilon \# 1$.

c) Feuille aux stomates plus ou moins fermés. La résistance à la diffusion dans le canal stomatique abaisse la tension de vapeur à la sortie du stomate. Il en résulte comme en (*b*) un abaissement de la tension en équilibre sur toute la surface de la feuille. Au gradient plus ou moins important de tension de vapeur dans le stomate, correspondra également un gradient semblable exprimé en DPD ou en tension de vapeur au niveau des parois des cellules épidermiques et de la cuticule. Finalement, par le jeu plus ou moins parallèle de la régulation stomatique et cuticulaire, la tension de vapeur en équilibre s'abaisse sur toute la surface de la feuille. L'évapotranspiration réelle peut être très inférieure à ETP ($\varepsilon < 1$) même sans flétrissement apparent ($He \# 1$) grâce à la grande résistance possible au niveau du stomate et de la cuticule (ε_φ très faible).

Les différents termes de l'équation du bilan d'énergie s'expriment alors de la manière suivante :

1°) *Énergie cédée par évapotranspiration réelle.*

Le flux de vapeur perdu par la surface évaporante ou la surface de la feuille correspond à un flux d'énergie donné par :

$$\text{flux d'énergie} = L \cdot D\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{z=0} \qquad \text{(II, 17)}$$

$\left(\frac{\delta f}{\delta z}\right)_{z=0}$ désignant le gradient de tension de vapeur à la paroi. En tenant compte des propriétés de la couche limite laminaire dite équivalente on peut écrire (II, 17) selon les cas envisagés dans la figure 8 et en exprimant les évapotranspirations en énergie dans les 3 cas,

— Cas *a*)
$$ETP = L \cdot D \cdot \frac{F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)}{\Delta z_f} \qquad \text{(II, 18 } a\text{)}$$

— Cas *b*)
$$ETR = L \cdot D \cdot \frac{He \cdot F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)}{\Delta z_f} \qquad \text{(II, 18 } b\text{)}$$

ou

$$ETR \# \varepsilon_{He} \cdot L \cdot D \cdot \frac{F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)}{\Delta z_f}. \qquad \text{(II, 18}' \ b\text{)}$$

Or, comme He est très voisin de 1, $\varepsilon_{He} \# 1$ et l'on a :

$$ETR \# ETP. \qquad \text{(II, 18}'' \ b\text{)}$$

— Cas *c*)
$$ETR = \varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot \frac{H_e \cdot F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)}{\Delta z_f} \qquad \text{(II, 18 } c\text{)}$$

ou puisque généralement $\varepsilon_{He} \# 1$:

$$ETR = \varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot \frac{F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)}{\Delta z_f} \qquad \text{(II, 18}' \ c\text{)}$$

$$ETR = \varepsilon_\varphi . \ ETP. \qquad \text{(II, 18}'' \ c\text{)}$$

On a vu que ces trois cas pour lesquels la température de surface était la même ne correspondaient pas aux mêmes échanges d'énergie. Il serait donc faux de croire que, sous des conditions de milieu donné, le rapport entre ETR et ETP est donné par ε_φ (rapport des formules *a* et *c*) ; on doit en effet rappeler que la réduction de la transpiration liée à la régulation stomatique (ε_φ) ou à l'augmentation du D. P. D. (ε_{He}) a pour effet d'élever θ_{sr}. Pour un même climat extérieur, θ_{sr} sera plus grand dans le cas (*c*) que dans le cas (*a*), on a alors $\varepsilon_\theta > 1$.

Ainsi, dans le bilan d'énergie, le terme correspondant à l'évapotranspiration réelle peut se mettre sous la forme très générale suivante :

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \frac{\mathrm{H}e \cdot \mathrm{F}(\theta_{sr}) - \mathrm{F}(\theta_r)}{\Delta z_f}. \qquad \text{(II, 19)}$$

2°) *Énergie échangée par conduction-convection.*

Cette énergie correspond, à l'échelle où l'on étudie le phénomène, à un effet d'oasis qui peut selon les cas être positif ou négatif.

L'énergie échangée sous forme de chaleur sensible sera :

$$\textit{flux} = \mathrm{K} \cdot \left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_{z=0} \qquad \text{(II, 20)}$$

et en utilisant la notion de couche limite laminaire équivalente, devient :

$$\textit{flux} = \mathrm{K} \cdot \frac{\theta_{sr} - \theta_a}{\Delta z_\theta}. \qquad \text{(II, 21)}$$

3°) *Rayonnement net.*

Le rayonnement net est égal à la différence entre le rayonnement émis qui correspond généralement à celui du corps noir (σT^4) puisque l'émissivité est voisine de 1 et le rayonnement absorbé. Celui-ci provient, d'une part de l'atmosphère et des corps voisins, d'autre part du soleil, l'absorption étant d'ailleurs très variable avec la composition spectrale et l'angle d'incidence. Dans le cas d'une feuille bien dégagée vers le zénith et placée horizontalement, la face supérieure aura un rayonnement net voisin de celui envisagé dans le premier chapitre :

$$\mathrm{R}n = (1 - a)\mathrm{R}g + \mathrm{R}'a - \sigma''\mathrm{T}^4$$

La face inférieure dirigée vers le sol aura par contre un rayonnement net presque nul.

Finalement, l'équation du bilan d'énergie s'écrit :

$$-\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \frac{\mathrm{H}e \cdot \mathrm{F}(\theta_{sr}) - \mathrm{F}(\theta_r)}{\Delta z_f} - \mathrm{K} \cdot \frac{\theta_{sr} - \theta_a}{\Delta z_\theta} + \mathrm{R}n = 0. \qquad \text{(II, 22)}$$

Or, d'après les propriétés des couches limites, on peut écrire :

$$\frac{\Delta z_f}{\Delta z_\theta} \# \frac{\delta_f}{\delta_\theta} \qquad \text{(II, 23)}$$

mais d'après (II, 10) on a :

$$\frac{\delta_f}{\delta_\theta} = \left(\frac{\mathrm{D} \cdot c \cdot \rho}{\mathrm{K}}\right)^{1/3} \qquad \text{(II, 10)}$$

d'où :

$$\frac{\Delta z_f}{\Delta z_\theta} \# \left(\frac{D \cdot c \cdot \rho \cdot}{K}\right)^{1/3}. \qquad \text{(II, 24)}$$

Le rapport (II, 24) sera désigné par β dans la suite du texte.

L'équation (II, 22) s'écrit alors :

$$\boxed{-L \cdot D \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \{He \cdot F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)\} - K \cdot \{\theta_{sr} - \theta_a\} \cdot \beta + R_n \cdot \Delta z_f = 0.} \qquad \text{(II, 25)}$$

Or, en exprimant l'épaisseur de Δz_f de la couche limite équivalente en fonction du coefficient de forme et de dimension C_f et de la vitesse du vent U, on a d'après (II, 16) :

$$\Delta z_f = \Gamma_f(l^{1/2}, u^{-1/2}). \qquad \text{(II, 16)}$$

Finalement (II, 25) s'écrira :

$$\boxed{-L \cdot D \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \{He \cdot F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)\} - K \cdot \{\theta_{sr} - \theta_a\} \cdot \beta + R_n \cdot \Gamma_f(l^{1/2}, u^{-1/2}) = 0.} \qquad \text{(II, 26)}$$

Cette équation générale du bilan d'énergie va permettre d'étudier successivement en fonction des facteurs climatiques (θ_a, θ_r, U, Rn) et du coefficient faisant intervenir la forme et la dimension $\Gamma_f(l)$, la température (θ_{sr}) d'une feuille, sa tranpiration [L. D. ε_φ. } H e. F(θ_{sr}) — F(θ_r) {] et indirectement sa régulation stomatique (ε_φ).

c) *Température d'un organe végétal*

En partant de l'équation (II, 26), il est possible d'évaluer la température de surface θ_{sr} par rapport à la température de l'air en dehors de la couche limite. Cette température de l'air est elle-même évidemment variable dans l'espace par rapport à celle mesurée sous abri météorologique à 2 m.

Dans le cas où il n'existe pas de flétrissement marqué, He est très voisin de 1. On peut écrire, en assimilant la corde à la tangente :

$$He \cdot F(\theta_{sr}) - F(\theta_r) \# F'\left(\frac{\theta_{sr} + \theta_r}{2}\right) \cdot (\theta_{sr} - \theta_r). \qquad \text{(II, 27)}$$

Par ailleurs,

$$\theta_{sr} - \theta_r = (\theta_a - \theta_r) - (\theta_a - \theta_{sr}) \qquad \text{(II, 28)}$$

on peut écrire :

$$F'\left(\frac{\theta_{sr} + \theta_r}{2}\right) \cdot (\theta_a - \theta_r) \# F'\left(\frac{\theta_a + \theta_r}{2}\right) \cdot (\theta_a - \theta_r) \qquad \text{(II, 29)}$$

d'où, en posant :

$$F(\theta_a) - F(\theta_r) = \Delta f \qquad \text{(II, 30)}$$

Δf désignant le déficit de saturation à l'air libre.

Il vient après calcul à partir de (II,26) .

$$\theta_{sr} - \theta_a = \frac{-\varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} + Rn}{\varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot F'(\theta) + K \cdot \beta} \cdot \Delta z_f \qquad \text{(II, 31)}$$

ou en remplaçant Δz_f par son expression $\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})$

$$\boxed{\theta_{sr} - \theta_a = \frac{-\varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot \Delta f + Rn \cdot \Gamma_f(l^{1/2}, u^{-1/2})}{\varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot F'(\theta) + K \cdot \beta}} \qquad \text{(II, 32)}$$

expression qui donne la température de surface θ_{sr}, en fonction des caractéristiques du corps $\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})$ et des facteurs climatiques $[\theta_a, \theta_r, U, Rn]$

On notera que le terme $L \cdot D \cdot \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f}$ correspond à l'évaporation d'une surface liquide dont le coefficient de forme serait le même que l'organe considéré, mais dont la température de surface serait celle de l'air. Il correspond donc au terme E_a de la formule de PENMAN rapporté à un corps de même forme et de même dimension. A cette échelle, le terme E_a représente une évaporation qui peut être supérieure, égale ou inférieure à ETP ponctuelle défini par $\varepsilon_\varphi = 1$.

L'égalité (II, 32) se met sous la forme :

$$\boxed{\theta_a - \theta_{sr} = \frac{\varepsilon_\varphi \cdot Ea - Rn}{\varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot F'(\theta) + K \cdot \beta} \cdot \Gamma_f(l^{1/2}, u^{-1/2}).} \qquad \text{(II, 33)}$$

Ainsi, $\theta_a - \theta_{sr}$ change de signe pour :

$$Rn = \varepsilon_\varphi \cdot Ea \qquad \text{(II, 34)}$$

soit encore :

$$Rn = \varepsilon_\varphi \cdot L \cdot D \cdot \Delta f \cdot \Gamma_f^{-1} \ (l^{1/2}, u^{-1/2}) \qquad \text{(II, 35)}$$

Selon la régulation stomatique (ε_φ) le rayonnement net (Rn) la vitesse du vent (U), le déficit de saturation (Δf) et le coefficient de forme $\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})$, la température de surface de l'organe pourra être inférieure, égale ou supérieure à celle de l'air ambiant. De très simples applications numériques des formules (II, 32 ou II, 33) montrent que ces écarts de température, très variables, peuvent atteindre facilement 5 à 10°. Ces ordres de grandeur sont bien en accord avec les données expérimentales (cf. de PARCEVAUX, 1963).

A l'échelle où l'on se place dans ce chapitre, la donnée de la température de l'air ne constitue donc qu'une approche très grossière de la température d'un corps. Cependant, on verra ultérieurement que lorsqu'un couvert végétal abondant possède une évapotranspiration réelle voisine de ETP, tout se passe à l'échelle de la journée comme si sa température de surface était voisine de celle de l'air. Cette remarque justifiera donc la prise en considération de la température de l'air recueillie sous abri météorologique comme première référence pour étudier des phénomènes biolo-

giques intéressant de longues périodes de temps et l'ensemble d'une population de végétaux. Par contre, dès que l'on veut descendre à une échelle plus fine dans le temps ou dans l'espace, on doit s'attendre à de très larges variations autour de la température de l'air. On constate d'après les formules (II, 31, II, 32 ou II, 33) que seule la connaissance de tous les facteurs climatiques ou biologiques susceptibles d'intervenir permettront de juger de leur influence réciproque.

On note que la température de la surface s'élève par rapport à celle de l'air à mesure que le rayonnement net positif s'accroît et s'abaisse dans les mêmes conditions quand la vitesse du vent augmente. Si le rayonnement net est nul, la température de surface devient indépendante de la vitesse du vent, puisque le terme Δz_f n'intervient plus dans (II, 25). On retrouve évidemment la propriété bien connue du thermomètre mouillé du psychromètre dont la température est en principe indépendante de la vitesse de ventilation (BOUCHET et RIOU, 1960).

Si les conditions climatiques restent constantes (θ_r, θ_a, Rn, vent) et pour un coefficient de forme Γ_f donné, la température de surface θ_{sr} diminue lorsque ε_φ augmente. Dans ces conditions les variations de la température de surface peuvent servir à étudier la régulation stomatique en donnant les variations de ε_φ. Cette méthode n'est évidemment utilisable que dans la mesure où les facteurs climatiques ne varient que lentement (Rayonnement global et turbulence) par rapport aux phénomènes physiologiques (fermeture ou ouverture des stomates) (cf. de PARCEVAUX, GUYOT, DAMAGNEZ).

La forme et la dimension $[\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})]$ des organes végétaux contribuent à diversifier fortement la température de surface pour un même climat. On a vu que l'épaisseur des couches limites augmentait avec les dimensions des corps. Tout se passe comme si un organe important était moins ventilé qu'un organe plus petit ou mieux isolé du milieu extérieur.

Il ressort de ces considérations que les enceintes transparentes, utilisées pour effectuer des mesures de transpiration ou d'activité photosynthétique, modifient considérablement les phénomènes que l'on se propose d'étudier. « L'effet de serre » plus ou moins important selon les caractéristiques optiques des parois peut aller jusqu'à doubler l'effet du rayonnement global. Le rayonnement net est alors complètement changé. Si l'on ajoute à cette action la modification de la couche limite par l'intermédiaire de la ventilation, on constate que les conditions dans l'enceinte sont très éloignées de celles des conditions naturelles. Même en contrôlant toutes les variables de l'équation (II, 32 ou II, 33), il sera extrêmement délicat de transposer les résultats obtenus avec ces méthodes aux conditions naturelles.

Ainsi, la température d'un organe végétal variera dans de très larges limites autour de la température de l'air. Dans le cas où les stomates sont très ouverts (phase diurne) et à l'abri du rayonnement global, la limite inférieure de cette température est donnée par le thermomètre mouillé placé sous abri. La limite supérieure, lorsque la transpiration est nulle, dépend directement du rayonnement net et du coefficient de forme. GODARD a trouvé un écart de 20° par rapport à l'air pour des grains de raisin noir à Montpellier (France). Toutes les fluctuations étant possibles entre ces deux limites, on constate qu'à échelle fine, les réactions biochimiques peuvent s'inscrire dans des climats très différents de ceux définis par la température de l'air.

d) *Transpiration réelle*

L'équation (II, 19) va permettre d'évaluer la transpiration réelle d'un organe végétal en fonction des facteurs climatiques, du coefficient de forme $\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})$ et de la régulation stomatique et cuticulaire (ε_φ). On pourra alors discuter l'interaction de ces facteurs et essayer de voir comment, en agissant sur les différents termes du climat, on contribue, à petite échelle, à modifier la transpiration réelle.

D'après (II, 19) ETR s'écrit :

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \frac{\mathrm{H}e \cdot \mathrm{F}(\theta_{sr}) - \mathrm{F}(\theta_r)}{\Delta z_f} \qquad \text{(II, 19)}$$

ou en explicitant Δz_f selon (II, 16) :

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \{\mathrm{H}e \cdot \mathrm{F}(\theta_{sr}) - \mathrm{F}(\theta_r)\} \cdot \Gamma_f^{-1}(l^{1/2}, \mathrm{U}^{-1/2}) \qquad \text{(II, 36)}$$

Dans la plupart des problèmes intéressant les plantes cultivées, on se place dans le cas où le point de flétrissement n'est pas atteint. On a généralement un D. P. D. inférieur à 25 atmosphères et une humidité relative en équilibre supérieure à 98 p. 100 ; $\mathrm{He} \cdot \mathrm{F}(\theta_{sr})$ sera donc confondu avec $\mathrm{F}(\theta_{sr})$, c'est-à-dire $\varepsilon_{\mathrm{He}} = 1$.

L'égalité (II, 36) s'écrit :

$$\mathrm{ETR} = \varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta) \cdot (\theta_{sr} - \theta_r) \cdot \Gamma_f^{-1}(l^{1/2}, \mathrm{H}^{-1/2}) \qquad \text{(II, 37)}$$

or,

$$\theta_{sr} - \theta_r = (\theta_a - \theta_r) - (\theta_a - \theta_{sr}) \qquad \text{(II, 38)}$$

et en exprimant $\theta_a - \theta_{sr}$ d'après (II, 31), il vient pour (II, 19) :

$$\boxed{\mathrm{ETR} = \frac{\mathrm{R}n + \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} \cdot \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}}} \qquad \text{(II, 39)}$$

ETR se met alors sous la forme :

$$\mathrm{ETR} = \mathrm{R}n \cdot \frac{1 + \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} \cdot \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{R}_n \cdot \mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}} \qquad \text{(II, 40)}$$

ou encore, en explicitant Δz_f :

$$\boxed{\mathrm{ETR} = \mathrm{R}n \cdot \frac{1 + \dfrac{\Delta f \cdot \mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{R}n \cdot \mathrm{F}'(\theta) \cdot \Gamma_f(l^{1/2}, \mathrm{U}^{-1/2})}}{1 + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}}} \qquad \text{(II, 41)}$$

Comme pour la définition de la température de surface, on retrouve évidemment dans celle de ETR, d'une part les facteurs climatiques (θ_a, θ_{sr}, rayonnement net, vent) et d'autre part, le coefficient de forme par l'intermédiaire du terme $\Gamma_f(l^{1/2}, U^{-1/2})$ et la régulation stomatique (ε_φ).

On notera avec intérêt que cette formule donnant ETR à petite échelle est semblable à la formule de PENMAN donnant ETP. On a vu, en effet que le terme $L.D. \frac{\Delta f}{\Delta z_f}$ correspondrait au terme E_a de la formule de PENMAN. Par ailleurs, si l'on applique la formule du bilan d'énergie au cas du thermomètre mouillé sous abri ($Rn \neq 0$) le rapport $\frac{K}{\Delta z_\theta} : \frac{L.D.}{\Delta z_f}$ s'écrit d'après (II, 24) :

$$\frac{\frac{K}{\Delta z_\theta}}{\frac{L \cdot D}{\Delta z_f}} = \frac{K \cdot \beta}{L \cdot D} \qquad \text{(II, 42)}$$

Or, ce rapport n'est autre que la constante psychrométrique désignée dans la formule de PENMAN par γ.

Dans ces conditions, la formule (II, 39) proposée pour ETR s'écrit en fonction des notations de PENMAN :

$$\boxed{ETR = \frac{Rn \cdot F'(\theta) + \gamma \cdot E_a}{F'(\theta) + \frac{\gamma}{\varepsilon_\varphi}}} \qquad \text{(II, 43)}$$

Quand $\varepsilon_\varphi = 1$, c'est-à-dire par définition quand ETR = ETP, on a :

$$ETP = \frac{Rn \cdot F'(\theta) + \gamma \cdot E_a}{F'(\theta) + \gamma} \qquad \text{(II, 44)}$$

qui constitue bien la formule de PENMAN établie pour donner ETP à une autre échelle. Dans l'équation (II, 44), le rayonnement net est celui du corps considéré et E_a représente l'évaporation du même corps si sa température de surface était celle de l'air.

Si l'on désigne par Q la chaleur sensible échangée par conduction-convection entre l'organe et l'air libre $\left(K \cdot \frac{\theta_{sr} - \theta_a}{\Delta z_\theta}\right)$ dans la formule (II, 21), on a :

$$Rn = ETR + Q \qquad \text{(II, 45)}$$

formule qui reste d'ailleurs valable quand on change d'échelle de temps et d'espace et qui permet de retrouver celle déjà donnée dans le premier chapitre, Q devenant la chaleur échangée par conduction dans le sol ou convection dans l'air avec l'extérieur.

Il vient alors pour (II, 43), en tenant compte de (II, 45) :

$$ETR = \varepsilon_\varphi \cdot \left[\frac{Q \cdot F'(\theta)}{\gamma} + E_a\right] \qquad \text{(II, 46)}$$

ou :

$$\mathrm{ETR} = \frac{\varepsilon_\varphi}{\gamma} \cdot \left[\mathrm{Q} \cdot \mathrm{F}'(\theta) + \gamma \mathrm{E}_a \right]. \qquad \text{(II, 47)}$$

Les formules (II, 43) et (II, 47) vont permettre de discuter maintenant les variations de ETR en fonction des facteurs climatiques. Les éléments de cette discussion seront utiles quand on envisagera sur le plan agronomique de modifier le climat dans un sens favorable à la production agricole.

Supposons d'abord que le terme ε_φ reste constant quand les autres facteurs varient. Ce sera notamment le cas quand les stomates sont largements ouverts ($\varepsilon_\varphi = 1$ ou ETR = ETP) ou quand ε_φ devient très faible par suite de la fermeture des stomates, la transpiration étant alors seulement cuticulaire. On constate que ETR sera une fonction linéaire du rayonnement et de Ea, c'est-à-dire de $\Delta f \cdot \Gamma_f^{-1}(l^{1/2}, u^{-1/2})$. L'installation d'un brise-vent (cf. GUYOT) n'affecte que très faiblement le rayonnement mais par contre, abaisse sensiblement Ea en agissant sur U. Dans ces conditions, la transpiration diminuera.

Généralement, la modification des conditions de milieu s'accompagne de la modification du terme ε_φ par l'intervention de la régulation stomatique. Nous allons donc supposer ε_φ variable mais, pour faciliter la discussion, on admettra le déficit de saturation et la transpiration totale (cuticulaire et stomatique) constants. La première hypothèse peut être admise dans certaines limites par le fait que θ_a et θ_r sont commandés par ETR à une échelle plus importante. La deuxième hypothèse est justifiée par la notion de débit maximal en eau transpirée que peut assurer un végétal, notion dont on verra plus loin l'utilité mais qui ressort nettement des mesures instantanées de transpiration de PARCEVAUX et des équations de diffusion de l'eau dans le sol de HALLAIRE.

Avec ces hypothèses, on constate d'après la formule (II, 40) :

$$\mathrm{ETR} = \mathrm{R}n \cdot \frac{1 + \dfrac{\Delta f}{\Delta z_f} \cdot \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{R}n \cdot \mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}} \qquad \text{(II, 40)}$$

que, selon la valeur du rayonnement net par rapport à la transpiration, on rencontrera trois cas possibles :

1. — Quand le rayonnement net est plus grand que ETR, c'est-à-dire $\theta_{sr} > \theta_a$ (zone humide ou subhumide, en l'absence d'apport advectif d'énergie), l'équation (II, 40) donne :

$$\frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} < \frac{\mathrm{R}n}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \Delta f}. \qquad \text{(II, 48)}$$

ε_φ variera moins vite que Δz_f ; tout se passe comme si la régulation stomatique variait relativement moins que le vent.

2. — Quand le rayonnement net est égal à ETR, on a $\theta_{sr} = \theta_a$.

$$\frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} = \frac{\mathrm{R}n}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \Delta f}. \qquad \text{(II, 49)}$$

ε_φ varie comme Δz_f ; la régulation stomatique varie parallèlement avec le vent.

3. — Quand le rayonnement net est plus petit que ETR, $\theta_{sr} < \theta_a$ (zone sèche, apport advectif d'énergie ou effet d'oasis positif).

$$\frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} > \frac{\mathrm{R}n}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \Delta f}. \qquad \text{(II, 50)}$$

ε_φ varie plus vite que Δz_f : la régulation stomatique varie plus que les variations du vent.

On verra ultérieurement l'intérêt de ces conclusions pour interpréter l'action possible des brise-vent non seulement sur la consommation d'eau mais également sur la production de matière sèche, donc sur l'efficience de l'eau consommée.

Ainsi, lorsque l'on diminue le terme E_a par l'installation de brise-vent, la possibilité d'assurer un certain débit d'eau, se traduit pour la plante par un changement de l'intensité de la régulation stomatique variable selon les valeurs relatives du rayonnement net et de la transpiration. La prise en considération de ces différences de comportement permet à Guyot d'interpréter certaines actions en apparence contradictoires des brise-vent (cf. Guyot, 1963).

e) Régulation stomatique et cuticulaire — Transpiration relative $\varepsilon = \dfrac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}}$

On a rappelé succinctement les différents phénomènes physiologiques qui avaient pour effet de réduire ETR par rapport à ETP. Il paraît donc logique pour les évaluer d'en faire le rapport comme le proposent de nombreux auteurs. On va montrer que la transpiration relative, obtenue en faisant le rapport entre la transpiration réelle et l'évaporation prise comme donnant ETP, ne traduit que d'une manière approchée la régulation stomatique et cuticulaire. En effet, toute régulation de la transpiration produit une modification de la température de la surface, donc de la transpiration elle-même. On avait désigné par ε_φ le rapport entre ETR et ETP pour une même température de surface ce qui revenait à admettre $\varepsilon_\theta = 1$. L'inverse de ce rapport ε_φ indique la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau résultant des phénomènes de régulation stomatique et cuticulaire. On se propose donc d'évaluer ε_φ à partir de la transpiration et de l'évaporation instantanée à l'échelle de la feuille. Généralement, l'évaporation est mesurée sur une surface évaporante (exemple : pastille d'évaporomètre Piche) semblable à la surface découpée d'une feuille sur laquelle on mesure la transpiration. A partir de la formule (II, 39) qui donne la transpiration et l'évaporation, nous allons pouvoir expliciter le rapport $\dfrac{\mathrm{T}}{\mathrm{E}}$ ou $\dfrac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}}$. Dans les équations, on fera figurer avec l'indice T les valeurs relatives à l'organe végétal et avec l'indice E celles relatives à la surface donnant l'évaporation.

On aura pour la transpiration de la feuille d'après (II, 39) :

$$\mathrm{ETR} = \frac{\mathrm{R}n_\mathrm{T} + \left(\dfrac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_\mathrm{T} \cdot \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}} \qquad \text{(II, 51)}$$

et pour le corps de référence donnant l'évaporation potentielle ($\varepsilon_\varphi = 1$) :

$$\mathrm{ETP} = \frac{\mathrm{R}n_{\mathrm{E}} + \left(\frac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_{\mathrm{E}} \cdot \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}} \qquad \text{(II, 52)}$$

d'où pour le rapport $\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}}$ désigné sous le nom de transpiration relative :

$$\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \frac{\mathrm{R}n_{\mathrm{T}} + \left(\frac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_{\mathrm{T}} \cdot \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{F}'(\theta)}}{\mathrm{R}n_{\mathrm{E}} + \left(\frac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_{\mathrm{E}} \cdot \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{F}'(\theta)}} \cdot \frac{1 + \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}}{1 + \frac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\varepsilon_\varphi \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}} \qquad \text{(II, 53)}$$

Si la feuille présente le même albédo que le modèle donnant l'évaporation (ce cas correspond à $\varepsilon_\alpha = 1$ dans le texte de PARCEVAUX, 1963) et si le modèle et la feuille sont placés dans les mêmes positions, malgré les écarts dans les températures de surface résultant de la réduction de la transpiration, on pourra admettre, en première approximation, l'égalité des rayonnements nets.

$$\mathrm{R}n_{\mathrm{T}} \# \mathrm{R}n_{\mathrm{E}}. \qquad \text{(II, 54)}$$

De même, si les coefficients de forme et de dimension sont les mêmes, on peut admettre :

$$\left(\frac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_{\mathrm{T}} \# \left(\frac{\Delta f}{\Delta z_f}\right)_{\mathrm{E}} \qquad \text{(II, 55)}$$

l'équation (II, 53) s'écrit alors :

$$\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \varepsilon_\varphi \cdot \frac{1 + \frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}{\mathrm{K} \cdot \beta}}{1 + \varepsilon_\varphi \cdot \frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}{\mathrm{K} \cdot \beta}} \qquad \text{(II, 56)}$$

en posant (II, 57) $\frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}{\mathrm{K} \cdot \beta} = \lambda(\theta)$, il vient : (II, 57)

$$\boxed{\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \varepsilon_\varphi \cdot \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \varepsilon_\varphi \cdot \lambda(\theta)}}. \qquad \text{(II, 58)}$$

Le rapport $\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}}$ est non seulement fonction de ε_φ comme cela semble évident, mais également du rapport $\frac{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D} \cdot \mathrm{F}'(\theta)}{\mathrm{K} \cdot \beta}$ qui est une fonction de la température. L'égalité (II, 58) suppose d'après (II, 55) que les couches limites $(\Delta z_f)_{\mathrm{T}}$ et $(\Delta z)_{\mathrm{E}}$ sont les mêmes, c'est-à-dire que les corps considérés ont même forme, même dimension, et même rugosité (ce cas correspond à $\varepsilon_m = 1$ dans le texte de PARCEVAUX, 1963).

Si nous reprenons les notations (II, 13) et (II, 14), on voit le sens à donner à cette correction. On a en effet :

$$\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \varepsilon \text{ et } \varepsilon = \varepsilon_\varphi \cdot \varepsilon_\theta \cdot \varepsilon_{He}$$

or,

$$\frac{\mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}} = \varepsilon_\varphi \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \varepsilon_\varphi \cdot \lambda(\theta)}.$$

Comme on est éloigné du flétrissement, ($He \neq 1$ et $\varepsilon_{He} \neq 1$), il résulte que :

$$\varepsilon_\theta = \frac{1 + \lambda(\theta)}{1 + \varepsilon_\varphi \cdot \lambda(\theta)}. \qquad \text{(II, 59)}$$

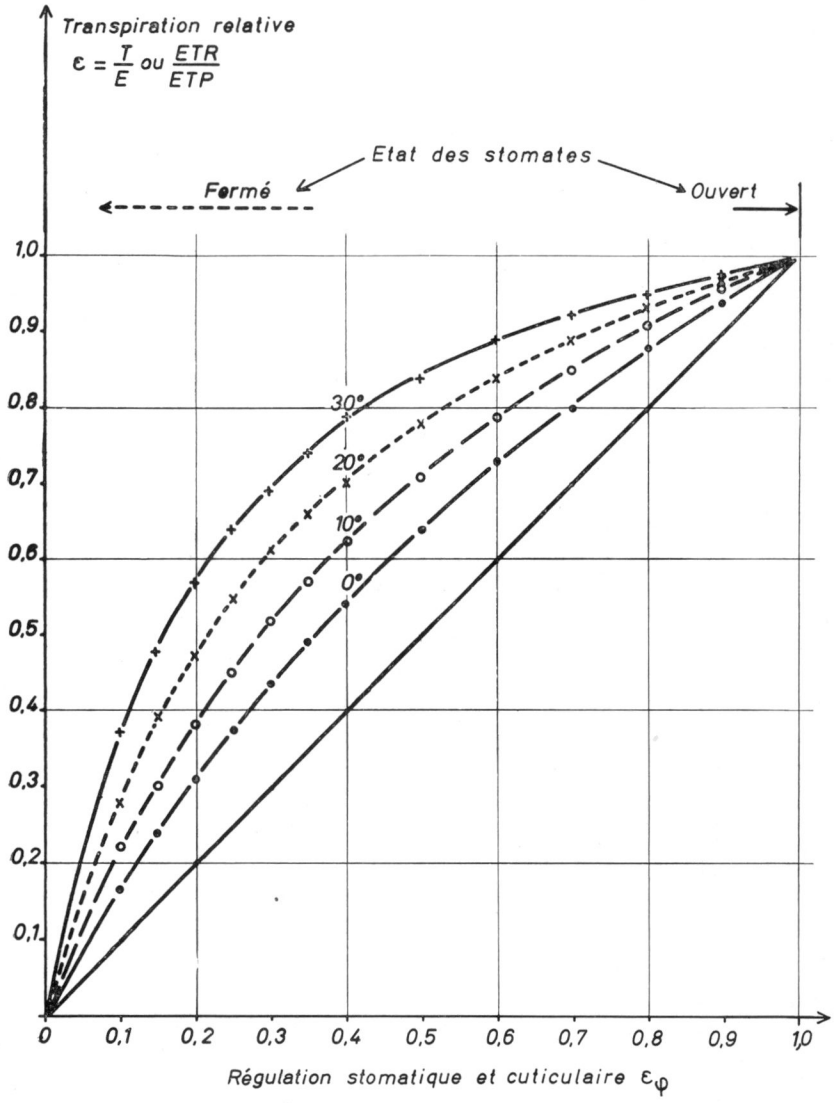


FIG. 9. — *Transpiration relative* $\varepsilon = ETR/ETP$ *en fonction de la régulation stomatique et cuticulaire* ε_φ *et de la température de surface* θ_{sr}.

Dans le cas de la comparaison de l'évaporation d'un corps et de la transpiration d'une plante les coefficients de forme, de dimension, de rugosité et l'albedo doivent être les mêmes.

Ainsi, la correction introduite est due à la modification de la température de surface apportée par la réduction relative de la transpiration. Quand la régulation stomatique ou cuticulaire n'intervient pas, $\varepsilon_\varphi = 1$ entraîne $\varepsilon_\theta = 1$.

La figure 9 donne pour quelques valeurs de θ la correspondance entre le rapport $\frac{T}{E}$ et l'indice ε_φ de régulation de la transpiration.

On remarque que les valeurs obtenues pour le rapport $\frac{T}{E}$ sont supérieures à celle de ε_φ. Ainsi $\left(\frac{T}{E}\right)$ sous-estime systématiquement l'importance de la régulation stomatique ou cuticulaire, l'erreur étant d'autant plus forte que la température est plus élevée. Si l'on examine l'ensemble des données expérimentales du rapport $\frac{T}{E}$ pour des cultures très diverses, sous des climats très différents, on constate qu'au milieu de la journée, l'intervention de la régulation stomatique constitue le phénomène général, les stomates largement ouverts permettant une transpiration égale à ETP ponctuelle constituant l'exception (de PARCEVAUX, 1963). En fait, ces données brutes devraient, comme on vient de le voir, être corrigées. Les valeurs de ε_φ, que l'on tirerait de cette correction, renforceraient notre précédente conclusion en accroissant le rôle joué par la régulation stomatique ou cuticulaire. On verra ultérieurement toutes les conséquences qui peuvent être tirées de ces observations.

III. — ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE ET PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE

On sait que la production de matière sèche dépend des échanges gazeux et notamment d'oxygène et de gaz carbonique. Or, ces échanges se font comme pour la vapeur d'eau par la cuticule et les stomates à travers les couches limites relatives à ces gaz. On conçoit, dans ces conditions, qu'il puisse exister des relations entre la quantité d'eau transpirée par un végétal et sa production de matière sèche. On n'insistera pas sur toute la littérature publiée sur ce dernier sujet, tantôt pour la vérifier, tantôt pour montrer sa large variabilité. Nous nous proposons d'établir cette relation à l'échelle de la feuille pour déterminer non seulement les composantes du problème, mais surtout pour expliquer les fluctuations observées en fonction des facteurs climatiques et voir dans quelle mesure on pourrait les modifier pour améliorer la productivité de l'eau et agir sur la quantité des produits élaborés.

Bien que l'étude puisse se conduire indifféremment pour l'oxygène ou le gaz carbonique, on ne fera la démonstration que pour CO_2 pour lequel les pressions partielles étant très faibles, les équations de diffusion des gaz sont simples ; elles seraient beaucoup plus complexes pour l'oxygène :

Désignons par :

Δp, l'écart de pression partielle entre l'extérieur de la couche limite et les parois cellulaires. On sait que le gaz carbonique est très généralement facteur limitant de la production de matière sèche. On peut donc admettre que la pression partielle est presque nulle au niveau de la cellule, lorsqu'il y a activité photosynthétique.

Δz_p, l'épaisseur de la couche limite laminaire équivalente relative au gaz carbonique. On a vu qu'elle pouvait d'ailleurs s'exprimer en fonction d'un coefficient

de forme, de la vitesse du vent, c'est-à-dire en fonction des autres couches limites telles que celle relative à la vapeur d'eau.

D_p, le coefficient de diffusion à l'échelle moléculaire du gaz carbonique.

ε_p, un facteur de réduction qui indique la variation du flux de CO_2 dans la couche limite soit par suite du jeu de la régulation stomatique, soit de la modification de la structure des parois cellulaires. ε_p correspond à ε_φ pour la vapeur d'eau et ne fait évidemment pas intervenir d'autres termes analogues à ε_θ ou ε_{He}.

$\varphi(R_g)$ une fonction du rayonnement global (Rg) qui donne la quantité de matière sèche élaborée par unité de temps ou son équivalent energetique à partir d'une quantité donnée de CO_2 consommée. Cette fonction $\varphi(R_g)$ recouvre donc l'ensemble des réactions biochimiques de la photosynthèse pour l'élaboration quantitative et qualitative de produits finis. La fonction φ dépend évidemment des conditions d'alimentation minérale.

On pourra alors écrire l'assimilation brute, Ass., produite par unité de temps sous la forme :

$$\text{Ass.} = \varphi(Rg) \cdot D_p \cdot \varepsilon_p \cdot \frac{\Delta p}{\Delta z_p}. \tag{II, 60}$$

Elle ne correspond évidemment pas à l'assimilation nette.

Étant donné l'analogie des phénomènes de diffusion du gaz carbonique et de la vapeur d'eau et de l'influence commune de la régulation stomatique et cuticulaire, on peut écrire à une constance C près :

$$\frac{\varepsilon_p}{\Delta z_p} = C \cdot \frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} \tag{II, 61}$$

d'où :

$$\text{Ass.} = C \cdot \varphi(Rg) \cdot \Delta p \, \frac{\varepsilon_\varphi \cdot \Delta_p}{\Delta z_f} \tag{II, 62}$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\text{Ass.} = C \cdot \varphi(Rg) \cdot \varepsilon_\varphi \cdot \Delta p \cdot \Gamma_f^{-1}(l^{1/2}, u^{-1/2}). \tag{II, 63}$$

On notera que la matière sèche élaborée pourra être fonction, toutes autres conditions restant égales [ε_φ, $\varphi(Rg)$, Δp, u] du coefficient de forme de la feuille qui, par l'intermédiaire de la couche limite, facilite plus ou moins la diffusion du gaz carbonique.

Or, d'après l'équation (II, 19) ou (II, 36) avec $He \neq 1$, on a :

$$\frac{\varepsilon_\varphi}{\Delta z_f} = \frac{\text{ETR}}{L \cdot D \cdot [F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)]}. \tag{II, 64}$$

En exprimant $F(\theta_{sr}) - F(\theta_r)$ grâce à (II, 28) ; (II, 29) ; (II, 30) ; (II, 31) et en portant la valeur trouvée pour (II, 64) dans (II, 62), il vient :

$$\boxed{\text{Ass.} = C \cdot \varphi(Rg) \cdot \Delta p \cdot (\text{ETR}) \cdot \frac{\varepsilon_\varphi + \dfrac{K \cdot \beta}{L \cdot D \cdot F'(\theta)}}{Rn\, \Delta z_f + \Delta f \cdot \dfrac{K \cdot \beta}{F'(\theta)}}.} \tag{II, 65}$$

La quantité de matière sèche élaborée est évidemment supérieure à la matière sèche nette par suite des phénomènes de respiration qui consomment une partie des produits synthétisés. Cependant, le gradient de gaz carbonique est lui-même

affecté, du moins le jour, par un dégagement théorique de CO_2. On admettra donc que l'on se trouve au-dessus du point de compensation. Dans ces conditions et malgré les très larges simplifications introduites, la formule (II, 65) permet d'étudier en fonction de la régulation stomatique, du coefficient de forme et des facteurs climatiques, la relation existant entre la matière sèche produite par une feuille et sa transpiration réelle.

De (II, 65), on peut tirer le rapport Transpiration/Matière sèche qui traduit en quelque sorte l'efficience de l'eau :

$$\boxed{\frac{\text{ETR}}{\text{matière sèche}} = \frac{1}{C \cdot \varphi(Rg) \cdot \Delta p} \cdot \frac{Rn \cdot \Delta z_f + \Delta f \cdot \dfrac{K \cdot \beta}{F'(\theta)}}{\varepsilon_\varphi + \dfrac{K \cdot \beta}{L \cdot D \cdot F'(\theta)}}} \qquad \text{(II, 66)}$$

Étant donné la relative constance de certains termes $\varphi(Rg)$, Δp et étant donné les phénomènes de compensation entre les variations de ε_φ et le milieu climatique (Δf, Δz_f, Rn), on conçoit facilement que l'ordre de grandeur de l'efficience de l'eau dans les conditions naturelles soit relativement bien déterminé. Cependant, le nombre de facteurs qui interviennent montre également combien ce rapport doit être sujet à variation en fonction de la plante, de ses conditions d'alimentation en eau et du climat.

Pour les données expérimentales qui seront utilisées pour discuter les formules (II, 65) et (II, 66), nous renvoyons à l'article de PARCEVAUX. On notera cependant le rôle joué par Δp qui met bien en évidence son caractère de facteur limitant. Les variations quotidiennes ou saisonnières du gaz carbonique peuvent donc jouer un rôle déterminant dans le niveau de production faisant intervenir de nombreux paramètres. On ne devra pas oublier dans des expériences globales sur le terrain qu'un défaut de fumure carbonique pourra contribuer à masquer les résultats que l'on attendait d'une amélioration apportée au problème de la dynamique de l'eau (cf. BALDY, rapport C/N).

On remarque toute l'importance que l'on doit accorder à la régulation stomatique et cuticulaire, ε_φ, pour juger l'efficience de l'eau. On a vu que, dans les conditions naturelles, ε_φ était, durant la plus grande partie de la phase diurne, très nettement inférieur à un [1]. Il en résulte que l'élaboration de la matière sèche au niveau de la feuille est sans doute considérablement limitée par l'intervention de la régulation stomatique et cuticulaire qui gêne les échanges gazeux. On ne connaîtrait donc pas actuellement le potentiel de production des végétaux, par suite d'un déséquilibre dans l'alimentation hydrique traduite par une faible transpiration relative à l'échelle de la feuille. Cette hypothèse semble être bien vérifiée par l'expérience rapportée par BOUCHET et de PARCEVAUX, (1963) et qui constitue en quelque sorte un changement d'échelle de temps et d'espace par rapport à l'équation (II, 65). Nous reviendrons au quatrième chapitre sur ce problème de l'efficience de l'eau et l'on examinera les solutions agronomiques envisageables pour améliorer cette efficience.

On note en effet, d'après (II, 66), qu'à rayonnement global égal, la production de matière sèche sera augmentée par une diminution du rayonnement net et de Δf,

[1] ε_φ traduit aussi bien la régulation hydrique que photique (cf. de PARCEVAUX pages 686 à 691). ε_φ n'est donc pas indépendant de $\varphi(Rg)$.

c'est-à-dire par une réduction de l'évapotranspiration potentielle. Cependant, un affaiblissement de la ventilation, en dehors de son rôle dans la réduction de la transpiration, pourrait diminuer la production de matière sèche en réduisant la diffusion de CO_2, mais l'atténuation de la turbulence aura généralement pour effet d'augmenter Δp ; il en résulte un effet de compensation. Finalement, les brise-vent, utilisés très souvent uniquement sous l'angle mécanique, ont une action bénéfique sur les rendements en réduisant ETP et en augmentant corrélativement ε_φ.

La fonction $\varphi(Rg)$ fait évidemment intervenir l'espèce végétale mais pour une même espèce, les différentes parties du feuillage ne sont pas dans les mêmes conditions écologiques. On sait combien (cf. BALDY, chapitre lumière) varie l'éclairement au sein d'une population végétale. Il en résulte que l'élaboration de matière sèche sera très variable dans les différentes strates de végétation. Or cette différenciation ne portera pas seulement sur l'aspect quantitatif, mais également qualitatif de la matière sèche produite. La composition spectrale de la lumière se modifiant en pénétrant dans la végétation, les produits élaborés vont varier d'un niveau à l'autre du feuillage (ROUX, 1962). Or, en dehors de l'indice foliaire, selon les facteurs climatiques et notamment selon la valeur de ETP, les phénomènes de régulation stomatique et cuticulaire pourront prendre des importances très variables aux différents niveaux du végétal. Il en résultera une variation relative de la qualité des produits élaborés par chaque feuille. Finalement, par l'intermédiaire de cette régulation stomatique et cuticulaire, dépendant du climat, une plante présentant une fonction φ (Rg) bien définie pourra élaborer des produits de qualité variable selon la sévérité des conditions de milieu et notamment de ETP. Par ce processus, nous touchons sans doute au problème des années exceptionnelles au point de vue qualité des produits, ou à la notion de crus attribuables à des microclimats spéciaux.

Ainsi, la production de matière sèche, en qualité comme en quantité, apparaît bien en première approximation en assez bonne corrélation d'une part avec la transpiration réelle, d'autre part avec l'évapotranspiration potentielle. On vient de constater combien pour une même transpiration, elle pouvait varier en fonction des conditions de milieu. Il est apparu que, pour améliorer la production quantitative, on devait tendre à réduire l'intervention de la régulation stomatique (ε_φ) en réduisant ETP. On examinera par la suite les moyens agronomiques possibles pour atteindre cet objectif.

CONCLUSIONS

La méthode du bilan d'énergie appliquée au niveau de la feuille durant un temps court permet d'analyser l'action et l'interaction d'un grand nombre de facteurs climatiques (θ_a, θ_r, U, R_n), biologiques (forme, dimension, albédo) physiologiques [régulation stomatique et cuticulaire (ε_φ), variation de D.P.D. (He)] sur la circulation de l'eau et la production de matière sèche.

A cette échelle, on a dû introduire la notion de couche limite et l'on a examiné comment le problème physique pouvait se simplifier sans perdre de l'intérêt en utilisant la couche limite laminaire dite équivalente. Il est alors facile en partant de l'équation générale du bilan d'énergie (II, 25) au niveau de la feuille, d'aboutir à un certain nombre de conclusions.

1°) A positions et à conditions climatiques égales, la température d'un organe végétal varie dans de très larges limites autour de la température de l'air libre. L'écart

dépend essentiellement de l'albédo, de la forme et de la dimension de l'organe, des phénomènes de transpiration. La limite inférieure de température est voisine de celle du thermomètre mouillé abrité. La limite supérieure peut dépasser de 20° la température de l'air. A échelle fine, la biochimie de la feuille s'inscrit donc dans un climat qui peut être très différent de celui que l'on définit généralement sous abri. Les formules proposées II, 31 ; II, 32 ; II, 33 permettent d'analyser et de pondérer l'influence des différents facteurs.

2°) La même analyse du bilan d'énergie montre que l'évapotranspiration potentielle ponctuelle est contingente. Elle dépend de l'albédo, de la forme et de la dimension du corps de réfécence. Elle n'a pas comme dans le premier chapitre un sens purement climatique. Une feuille aux stomates largement ouverts transpire une quantité d'eau sensiblement égale à ETP ponctuelle. L'évapotranspiration réelle met en relief le rôle essentiel joué par la régulation stomatique ou cuticulaire et les modifications du D.P.D.. Une formule (II, 40 ; II, 41 ; II, 43) analogue à celle de PENMAN permet d'obtenir ETR ou ETP en fonction des facteurs climatiques, du coefficient de forme, de l'albédo et de la régulation stomatique. La discussion de cette formule indique le sens de variation de ETR quand on modifie les conditions de milieu. Elle apporte une réponse au problème posé par l'influence des brise-vent sur la consommation d'eau des plantes et sur son efficience.

3°) La comparaison de ETR et de ETP indique l'importance de la régulation stomatique ou cuticulaire. L'utilisation des formules proposées ci-dessus montre que la donnée de la transpiration relative $\left(\varepsilon = \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}}\right)$ généralement utilisée sous-estime l'action de la régulation stomatique et cuticulaire ε_φ. On doit introduire une correction qui tient compte de la température (II, 58). Ainsi, le phénomène de régulation stomatique apparaît comme très général dans les conditions naturelles. Les feuilles à l'échelle où l'on se place, n'auraient une transpiration égale à ETP ponctuelle que durant des périodes de temps courtes par rapport à la vie du végétal. On en verra dans le quatrième chapitre les conséquences agronomiques.

4°) La comparaison de la circulation du gaz carbonique et de la vapeur d'eau dans les couches limites relatives à ces gaz permet d'établir une relation approchée entre la matière sèche produite à partir du gaz carbonique et la transpiration. Cette formule (II, 65) met en évidence le rôle du coefficient de forme ou de dimension et l'ensemble des facteurs du milieu (θ_a, θ_r, R_n, vent, pression partielle de CO_2) ; elle justifie l'utilisation du rapport matière sèche/eau comme ordre de grandeur ; elle permet surtout d'en expliquer les très larges variations. Il ressort de cette analyse que l'amélioration de l'efficience de l'eau doit être recherchée dans un abaissement de ETP ponctuelle afin de diminuer la fermeture des stomates et la régulation cuticulaire. Enfin, l'équation proposée, malgré les simplifications introduites, permet de comprendre comment la qualité des produits élaborés peut varier en fonction des conditions de milieu et notamment de ETP. On explique ainsi à partir de cette étude à petite échelle, les variations de qualité des produits liées à la notion de crus (variations dans l'espace des mésoclimats) ou liées aux années dites exceptionnelles (variations dans le temps du climat général d'une saison).

L'étude à échelle fine des évapotranspirations réelle et potentielle, ainsi que leurs liaisons avec la photosynthèse, nous conduit donc à deux ordres de conclusions :

a) Au point de vue méthodologique, il semble impossible à cette échelle de vou-

loir séparer les facteurs climatiques (θ_a, θ_r, R_n, vent, CO_2), physiques (forme, dimension, albédo) et physiologiques (régulation stomatique et cuticulaire, D.P.D.) ; l'un ne peut pas varier sans entraîner des réactions de l'autre. L'étude ne peut donc se présenter que sous l'angle des interactions et l'on a vu les précautions à prendre pour définir et évaluer la température de surface d'un organe, sa transpiration, sa régulation stomatique ou cuticulaire.

b) Il existe, au niveau de la feuille, un déséquilibre presque permanent entre ETR et ETP ponctuelles même sans phénomène visible. La production de matière sèche serait susceptible d'être limitée par le jeu de la régulation stomatique et cuticulaire qui freinerait également les échanges gazeux indispensables pour la photosynthèse. On verra ultérieurement les conséquences agronomiques et les moyens d'intervention. Cependant, on a remarqué que l'action sur le climat devrait avoir pour but d'abaisser ETP ponctuelle pour réduire le déséquilibre hydrique dont souffre la feuille, même sans flétrissement.

Troisième Chapitre

ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET ÉVAPORATION SOUS ABRI

Introduction

L'étude faite dans le chapitre précédent au niveau de la feuille a montré le rôle essentiel joué par l'évapotranspiration potentielle ponctuelle et instantanée sur le niveau possible de production de matière sèche et sur l'efficience de l'eau consommée. Il est donc nécessaire, pour alimenter correctement la plante en eau et rechercher les moyens d'améliorer son fonctionnement, de connaître le mieux possible les variations dans le temps ou dans l'espace de ETP.

Bien que l'évapotranspiration potentielle puisse se définir de manière unique comme l'évapotranspiration maximale quand l'énergie est le seul facteur limitant, on a dû distinguer deux cas.

Dans le premier chapitre, en se plaçant à l'échelle où l'on définit généralement le climat (abri météorologique à 2 m au-dessus du sol), c'est-à-dire à une échelle intermédiaire entre la turbulence et la convection [1] ($\geqslant e_2$), ETP apparaît comme dépendant essentiellement des phénomènes de rayonnement et de l'indice d'évapotranspiration $\left(\varepsilon = \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}}\right)$. L'énergie advective de grande échelle (e_4, e_5) n'intervient que pour modifier dans des limites assez étroites les valeurs de ETP. Il en résulte que pour un lieu donné, une époque déterminée de l'année d'une durée de l'ordre du mois, ETP varie relativement peu par rapport à d'autres facteurs météorologiques tels que la pluie. Il est alors couramment admis de prendre ETP comme une valeur assez constante pour l'étude des bilans hydriques à l'échelle régionale. Dans ce cadre, on ne voit pas ETP jouer un rôle déterminant dans la production agricole en dehors de la définition des besoins maximaux en eau.

Dans le deuxième chapitre, à échelle fine, au niveau de la feuille, ETP ponctuelle et instantanée apparaît au contraire comme un facteur limitant l'élaboration de la matière sèche, même si la plante est bien alimentée en eau. Par ailleurs, ETP devient contingente (forme, dimension du corps) et sous la dépendance directe du déficit de saturation de l'air et de la vitesse du vent. Les phénomènes de rayon-

[1] Définition des échelles, premier chapitre, page 747.

nement restent importants mais ne prennent plus la première place comme dans le premier chapitre. ETP est alors très variable selon les conditions locales du milieu et contribue à diversifier au maximum les possibilités de production de matière sèche.

Entre ces deux extrêmes, se trouve généralement le problème agricole. En effet, les champs cultivés de manière homogène ont rarement des dimensions correspondant à celles indiquées au 1er chapitre. Il en résulte que les besoins en eau des cultures vont généralement se définir, avec une importance relative variable, à partir des phénomènes de rayonnements, déterminants à grande échelle, et des phénomènes d'advection, prépondérants à petite échelle. Dans ces conditions, il est indispensable de pouvoir traduire au niveau du champ, toutes les fluctuations possibles de ETP dans le temps ou dans l'espace.

Comme on ne peut envisager en dehors d'établissements de recherches spécialisés d'utiliser avec toutes les précautions nécessaires des évapotranspiromètres donnant les ETP quotidiennes, il a semblé utile de mettre au point une formule permettant d'approcher au mieux les variations de ETP. Par ailleurs, la mesure doit être simple pour que l'on puisse envisager son extension dans les conditions agricoles. On a été ainsi conduit à utiliser les données de l'évaporation sous abri existant dans la plupart des réseaux météorologiques.

On se propose de montrer comment, en partant de ces données sous abri et en utilisant la formule de PENMAN, il est possible d'obtenir ETP. La formule proposée sera alors discutée en fonction des conditions instrumentales et en fonction du type de climat. On donnera quelques résultats qui montrent combien ETP est susceptible de varier à l'échelle de l'exploitation et on tentera d'indiquer tout le parti que l'on peut en tirer pour améliorer la production agricole.

I. — FORMULE DONNANT ETP A PARTIR DE L'ÉVAPORATION SOUS ABRI

La formule de PENMAN a déjà été présentée dans le deuxième chapitre (II, 44). Elle est généralement utilisée comme la majorité des formules météorologiques donnant ETP, à une échelle de temps et d'espace voisine de celle envisagée au premier chapitre. Elle combine l'influence des phénomènes de rayonnement et d'advection d'énergie. On va montrer que dans de nombreux cas, on peut en quelque sorte établir une relation entre le rayonnement net et les apports advectifs d'énergie par l'air.

D'après PENMAN :

$$\mathrm{ETP} = \frac{\mathrm{R}n \cdot \mathrm{F}'(\theta) + \gamma \cdot \mathrm{E}a}{\mathrm{F}'(\theta) + \gamma} \qquad \text{(III, 1)}\,*$$

selon les symboles déjà utilisés (page 768, chapitre II) et en introduisant la notion de couche limite équivalente, on peut écrire en remplacant γ par $\mathrm{K} \cdot \beta / \mathrm{L} \cdot \mathrm{D}$:

$$\mathrm{ETP} = \frac{\mathrm{R}n \cdot \mathrm{F}'(\theta) + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D}} \cdot \mathrm{E}a}{\mathrm{F}'(\theta) + \dfrac{\mathrm{K} \cdot \beta}{\mathrm{L} \cdot \mathrm{D}}} \qquad \text{(III, 2)}$$

* le chiffre romain indique le numéro du chapitre.

Or, l'équation (I, 1) traduisant le bilan énergétique d'une région sur une période de 24 heures peut se mettre sous la forme :

$$R'g + R'a - \sigma'T^4 + Q_{3\text{-}4\text{-}5} = ETR \qquad \text{(III, 3)}$$

On en déduit le rayonnement net $(1 - a)Rg + R'a - \sigma'T^4$

$$Rn = ETR - Q_{3\text{-}4\text{-}5} \qquad \text{(III, 4)}$$

et en posant comme on l'a déjà fait dans le premier chapitre :

$$\frac{ETR}{ETP} = \varepsilon \qquad \text{(III, 5)}$$

il vient :

$$Rn = \varepsilon \cdot ETP - Q_{3\text{-}4\text{-}5} \qquad \text{(III, 9)}$$

qui, porté dans (III, 2), donne :

$$ETP = \frac{\frac{K \cdot \beta}{L \cdot D} \cdot Ea + F'(\theta) \cdot Q_{3\text{-}4\text{-}5}}{\frac{K \cdot \beta}{L \cdot D} + (1 - \varepsilon)F'(\theta)}. \qquad \text{(III, 7)}$$

Ea peut être évaluée à partir des mesures effectuées sous abri. En effet, une surface évaporante placée sous abri donne une évaporation E_s qui se calcule à partir de la formule de PENMAN en écrivant que, dans ce cas particulier, le rayonnement net est nul. Cette hypothèse est justifiée par le fait que l'écart de température entre la surface évaporante (θ_s) et les parois de l'abri (θ_a) reste faible. Dans ces conditions particulières ($Rn \neq 0$), (III, 2) s'écrit :

$$E_s = \frac{\frac{K \cdot \beta}{L \cdot D} \cdot Ea}{F'(\theta) + \frac{K \cdot \beta}{L \cdot D}} \qquad \text{(III, 8)}$$

d'où :

$$E_a = E_s \cdot \left[1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}\right] \qquad \text{(III, 9)}$$

Or, à un coefficient de forme et de dimension près, E_s peut être évaluée à partir d'une surface évaporante quelconque placée sous abri. Il est commode d'utiliser, par exemple, l'évaporomètre « Piche » dont la pastille présente une inertie thermique négligeable.

On écrira :

$$E_s = \alpha_0 \cdot E_p \qquad \text{(III. 10)}$$

E_p désignant l'évaporation relevée sous abri à l'évaporomètre Piche et α_0 représentant le coefficient de passage E_s à E_p ; celui-ci fait intervenir notamment le coefficient de forme et de dimension relatif à l'instrument de mesure donnant E_p et la réduction éventuelle de ventilation due à l'abri.

(III, 9) et (III, 10) conduisent alors à :

$$E_a = \alpha_0 \cdot E_p \cdot \left[1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}\right] \qquad \text{(III, 11)}$$

Cette expression de E_a introduite dans (III, 7) donne pour ETP :

$$\mathrm{ETP} = \alpha_0 \cdot E_p \cdot \frac{1 + \dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}}{1 + (1 - \varepsilon)\dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}} + \frac{Q_{3-4-5}}{1 - \varepsilon + \dfrac{K \cdot \beta}{L \cdot D \cdot F'(\theta)}} \cdot \qquad \text{(III, 12)}$$

Généralement, dans les régions ou ETR est voisine de ETP, le terme Q_{3-4-5} durant 24 heures est faible. Quand ETR diminue par rapport à ETP, le déficit de saturation augmente et on peut admettre que Q_{3-4-5} reste faible devant E_a. On pourra donc dans de nombreux cas écrire :

$$\boxed{\mathrm{ETP} \# \alpha_0 \cdot E_p \cdot \frac{1 + \dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}}{1 + (1 - \varepsilon)\dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}}} \qquad \text{(III, 13)}$$

ou :

$$\mathrm{ETP} \# \alpha_0 \cdot \frac{(E_a)_{\mathrm{Piche}}}{1 + (1 - \varepsilon)\dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}} \qquad \text{(III, 14)}$$

$(E_a)_{\mathrm{Piche}}$ désignant l'évaporation d'une pastille évaporante « Piche » dont la température de surface serait celle de l'air.

L'équation (III, 13) donne ETP à un coefficient α_0 près, à partir de la mesure sous abri de l'évaporation, compte tenu d'une correction faisant intervenir la température θ et l'indice d'aridité ε.

II. — Discussion de la formule (III, 13)

Il sera commode pour la discussion d'utiliser le terme $(E_a)_{\mathrm{Piche}}$. En posant :

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \frac{1}{1 + (1 - \varepsilon)\dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}} \qquad \text{(III, 15)}$$

l'équation (III, 14) devient :

$$\boxed{\mathrm{ETP} \# \alpha \cdot (E_a)_{\mathrm{Piche}}} \qquad \text{(III, 16)}$$

L'évapotranspiration potentielle est fonction de l'évaporation d'une surface évaporante dont la température de surface serait continuellement la température de l'air. Cette surface évaporante constitue en quelque sorte un « modèle » donnant l'évapotranspiration potentielle. En utilisant la notion de couche limite équivalente, (III, 16) peut se mettre sous la forme :

$$\mathrm{ETP} \# \alpha \cdot L \cdot D \cdot \frac{\Delta f}{(\Delta z_f)_{\mathrm{Piche}}} \,. \qquad \text{(III, 17)}$$

La couche limite équivalente Δz_f sur le modèle est liée aux différentes couches limites équivalentes des multiples surfaces évaporantes par l'intermédiaire du vent. Cependant, le fait que la température de surface du modèle est θ_a ne signifie pas que la température des surfaces évaporantes naturelles soit égale à chaque instant à celle de l'air. On peut seulement conclure du raisonnement précédent que « tout se passe comme si », à l'échelle de 24 heures, l'ensemble des surfaces évaporantes étaient à la même température que l'air qui surmonte le « modèle ». On voit que pour de longues périodes de temps (deuxième chapitre, pages 773-774), il sera possible de prendre la température moyenne de l'air en première approximation pour traiter les problèmes relatifs à l'influence de la température sur un ensemble de végétaux.

Par ailleurs, l'évaporation sous abri correspond à un phénomène ayant lieu à une température θ_s, inférieure à celle de l'air θ_a, mais cette évaporation est dépendante de cette température (θ_s) par l'intermédiaire de $F'(\theta)$ (formule III, 8). On conçoit dans ces conditions, d'après la formule (III, 16), qu'il soit impossible de relier directement ETP à de simples mesures d'évaporation sous abri. On comprend alors mieux les critiques faites aux mesures d'évaporation sous abri pour traduire ETP. Ces évaporations sont obtenues avec une température de surface θ_s indépendante de la ventilation. Cette indépendance de la température θ_s de la vitesse du vent, utilisée en psychrométrie, permet d'ailleurs de corriger la donnée sous abri pour obtenir l'évaporation d'une surface maintenue à la température de l'air (θ_a).

Cette correction, par contre, n'est plus possible avec des évaporomètres situés en plein air. La température de surface est alors sous la dépendance de multiples facteurs fixes (albédo, coefficient de forme) mais également de facteurs variables (rayonnement net et vent). La correction des données de ces appareils devient impossible car elle est variable avec le type de climat et d'un instant à l'autre. La coïncidence de leur température de surface avec celle de l'air qui les surmonte sera donc fortuite. Les données recueillies en plein air (bac colorado ou pastille Piche — voir chapitre I) ne peuvent donner ETP climatique qu'avec un coefficient expérimental beaucoup plus variable que dans le cas de la valeur sous abri corrigée.

Le facteur α, reliant ETP climatique à $(E_a)_{\text{Piche}}$, fait intervenir un terme α_0 reliant l'évaporation sous abri et l'évaporation corrrespondant au terme E_a de PENMAN. α_0 est donc un coefficient instrumental dans la mesure où E_a n'est pas affectée par d'autres facteurs que ceux du milieu physique. Il va dépendre de la surface évaporante utilisée et de la réduction de ventilation résultant de la présence de l'abri. Ainsi, la dimension, la forme des surfaces vont intervenir ainsi que le type d'abri et ses conditions d'installation (hauteur au-dessus du sol). α_0 ne sera donc pas le même pour un évaporomètre de Wild ou une pastille « Piche ». L'abri ne devra pas posséder de direction privilégiée par rapport au vent, ni de régimes de réduction variables avec la vitesse de celui-ci. On sait, par exemple, qu'un abri anglais possède deux régimes de ventilation (EYRAUD, 1960) : le régime laminaire pour les vents inférieurs à 5 m/s, le régime turbulent pour les vents supérieurs à cette vitesse (mesurée à 18 m de hauteur). Dans la plupart des régions agricoles, le premier régime prédominera très nettement. On pourra alors admettre que le terme α_0 est constant pour un type d'évaporomètre et d'abri.

Mais dans certaines régions où des vents violents soufflent durant des périodes assez longues (ex : mistral), le deuxième régime peut prendre une importance relative plus grande que la normale et entraîner une modification de α_0 (cf. BALDY, 1963).

Le coefficient α dépend de l'aridité de la région par le terme ε. Tout se passe comme si α diminuait lorsque l'aridité augmente. Il existe un certain phénomène de compensation entre la variation de α et celle de E_a, qui augmente très fortement avec l'aridité.

Dans les régions où ETR = ETP telle que la forêt équatoriale, on a d'après (III, 13 et III, 14) :

$$\mathrm{ETP} = \alpha_0 \cdot (Ea)_{\mathrm{Piche}} \qquad \text{(III, 18)}$$

Comme dans ces dernières régions, la température est assez constante, il en est de même de $\frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}$; E_a étant proportionnelle à E_p, on a finalement :

$$\mathrm{ETP} \# \alpha_1 \cdot E_p \qquad \text{(III, 19)}$$

α_1 désignant une constante :

$$\alpha_1 = \alpha_0\left(1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}\right)$$

comme le signalent différents auteurs.

Dans les régions désertiques, ETR = 0 ou $\varepsilon = 0$, il vient (III, 20) :

$$\mathrm{ETP} = \alpha_0 \cdot \frac{(Ea)_{\mathrm{Piche}}}{1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}} \qquad \text{(III, 20)}$$

ou :

$$\mathrm{ETP} \# \alpha_0 \cdot Ep. \qquad \text{(III, 21)}$$

L'évapotranspiration potentielle est également calculable directement à partir de E_p mais avec un coefficient α_0 beaucoup plus faible que la constante α_1 du premier cas.

Dans les zones où ETR est comprise entre une valeur nulle et ETP, l'indice d'aridité et la température vont contribuer à diversifier α.

On remarque que la comparaison de l'évaporation corrigée sous abri et de l'évapotranspiration potentielle permet de définir α c'est-à-dire l'aridité de la région. En prenant l'étude des relations entre l'évaporation sous abri et potentielle dans ce sens, on voit que l'évaporation sous abri permet également de préciser l'aridité d'une région comme le signalent d'ailleurs DEACON, PRIESTLEY, SWINBANK.

III. — UTILISATION DE LA FORMULE

L'évaporation E_s relevée sous abri doit donc être corrigée par le terme $1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}$. La température moyenne à prendre en considération est la moyenne entre la température de l'air et celle du point de rosée :

$$\theta = \frac{\bar{\theta}_a + \bar{\theta}_r}{2}. \qquad \text{(III, 22)}$$

Les valeurs de ce terme correctif sont données dans le tableau 3. La détermination de ETP peut se faire directement au moyen d'abaque (cf. LOCOSTE, 1963).

TABLEAU 3

Coefficient de correction [1 + λ (θ)] *de l'évaporation sous abri*

Température (θ) en °C	0°	0°,5	1°	1°,5	2°	2°,5	3°	3°,5	4°	4°,5
Coefficient 1 + λ (θ)	1,81	1,84	1,87	1,89	1,92	1,95	1,98	2,01	2,04	2,07
Température θ	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
Coefficient 1 + λ (θ)	2,11	2,14	2,17	2,21	2,25	2,28	2,32	2,36	2,40	2,44
Température θ	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
Coefficient 1 + λ (θ)	2,49	2,53	2,57	2,62	2,66	2,71	2,76	2,81	2,86	2,92
Température θ	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5
Coefficient 1 × λ (θ)	2,97	3,03	3,08	3,14	3,20	3,26	3,32	3,39	3,45	3,52
Température θ	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
Coefficient 1 + λ (θ)	3,59	3,66	3,73	3,80	3,88	3,96	4,03	4,11	4,20	4,28
Température θ	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5
Coefficient 1 + λ (θ)	4,36	4,45	4,54	4,63	4,72	4,82	4,92	5,01	5,11	5,22

Tableau obtenu d'après la formule $1 + \frac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}$

$L = 597{,}3 - 0{,}566 \cdot \theta$

$D = \frac{0{,}622}{760} \cdot 10^{-4} (2{,}884 + 0{,}008\,41 \cdot \theta)$

$K = (0{,}580 + 0{,}001\,682 \cdot \theta)10^{-4}$. Dans ce tableau, β a été pris égal à un. Ce qui revient à confondre les couches limites relatives à la vapeur et la température.

L'estimation de $F'(\theta)$ à partir des tables de $F(\theta)$ et l'ajustement polynomial de $1 + \lambda(\theta)$ en fonction des constantes ci-dessus et de θ a été réalisée par le service de Biométrie de l'I. N. R. A.

On constate que, toutes autres conditions restant égales (vitesse du vent, déficit de saturation), l'évaporomètre sous abri donne une évaporation qui est une fonction décroissante lorsque la température augmente. Cette variation de l'évaporation sous abri avec la température explique que l'évaporation annuelle mesurée en forêt équatoriale soit sensiblement la même que celle mesurée à Paris, dans des climats présentant pourtant des ETP très différentes.

La température moyenne du point de rosée est plus difficile à obtenir. Elle demande soit des mesures régulières de psychrométrie, soit l'utilisation des données très hasardeuses des hygromètres enregistreurs. Heureusement, lorsque les masses d'air atmosphériques sont stables, le point de rosée varie relativement peu et une ou deux données psychrométriques au cours de la journée peuvent suffire. Une simplification supplémentaire peut être introduite, en région humide ou subhumide,

la température du point de rosée est voisine de la température minimum. On peut donc écrire :

$$\theta_r \# \theta_m. \qquad \text{(III, 24)}$$

Finalement, on a :

$$\theta = \frac{\frac{\theta_M + \theta_m}{2} + \theta_m}{2} \qquad \text{(III, 25)}$$

ou en faisant intervenir l'amplitude $\theta_M - \theta_m$

$$\theta = \theta_m + \frac{\theta_M - \theta_m}{4} \qquad \text{(III, 26)}$$

Dans le cas des zones arides pour lesquels $\theta_r < \theta_m$ cette dernière formule surestimerait θ et par suite la correction à effectuer.

D'après la discussion précédente, le terme α ne devrait pas présenter de fluctuations lorsque θ et ε sont constants. On a déterminé α à Versailles pour les années 1958 à 1962 en comparant les données d'évaporation sous abri corrigées et celles fournies par des évapotranspiromètres.

L'évapotranspiration potentielle était évaluée à partir de deux évapotranspiromètres constitués par des cuves de 4 m² couvertes de gazon (dactyle) possédant un plan d'eau constant à 0,60 m de profondeur et irriguées superficiellement. Les évapotranspiromètres étaient entourés d'un anneau de garde portant la même végétation et recevant les mêmes apports d'eau. L'ensemble du dispositif de mesure étant dans une zone relativement abritée du vent et présentant une évaporation réelle généralement importante, les effets d'oasis de petite échelle devaient rester faibles.

L'évaporation mesurée à l'évaporomètre Piche placé sous abri anglais était corrigée en fonction d'une température moyenne calculée à partir de la température moyenne de l'air $\left(\frac{\theta_M + \theta_m}{2}\right)$ et de la moyenne de la température du point de rosée prise à 9 h et à 16 h TU.

Durant la période d'avril à fin octobre pendant laquelle la végétation couvre régulièrement la région, on trouve un coefficient sensiblement constant ($\alpha \# 0{,}37$) et indépendant de l'année.

Ce résultat est bien en accord avec l'exposé précédent. En effet, ε et θ sont susceptibles de varier d'une année à l'autre, mais dans des proportions très étroites. En année sèche, α tend à diminuer, mais les effets d'oasis devenant plus importants compensent fortement cet effet. Par contre, de novembre à mars, période où la végétation couvre mal le sol, α est trop élevé ; tout se passe comme si le terme E_a de la formule de PENMAN était trop important pour cette couverture du sol ou comme si le terme $Q_{3\text{-}4\text{-}5}$ jouait un rôle différent durant cette période.

Dans l'état actuel des dépouillements, on est conduit à prendre α_0 voisin de 0,5 pour l'abri anglais à persienne double situé à 2 m et une pastille Piche de 13 cm² de surface évaporante totale.

IV. — VARIATIONS DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE

En utilisant les formules (III, 13) et (III, 16), il est possible de préciser les variations instantanées de ETP climatique durant la journée et de calculer les

variations d'intensité de ETP au cours du temps, dont on a souligné toute l'importance dans le deuxième chapitre sur l'efficience de l'eau consommée.

On a vu que tout se passait comme si les surfaces évaporantes étaient à la température de l'air. Si l'on désire connaître les ETP instantanées on peut raisonner sur le « modèle » E_a envisagé précédemment et l'on doit distinguer deux périodes. Une période nocturne durant laquelle les stomates sont fermés et le rayonnement net négatif ; ETR et même ETP sont alors inférieures à (E_a) nocturne. Une période diurne où les stomates peuvent être plus ou moins ouverts, mais surtout où le rayonnement net entraîne des températures supérieures à celle de l'air. Il en résulte que ETP sera alors supérieure à (E_a) jour. Selon l'importance de ces phénomènes, selon la durée plus ou moins longue du jour et de la nuit, l'ETP instantanée s'éloigne plus où moins de (E_a). Cependant. la fluctuation n'aura lieu qu'autour de E_a qui constitue la variable principale. Il est donc possible de représenter à un coefficient près généralement peu éloigné de un, la variation quotidienne de ETP à partir de αE_a

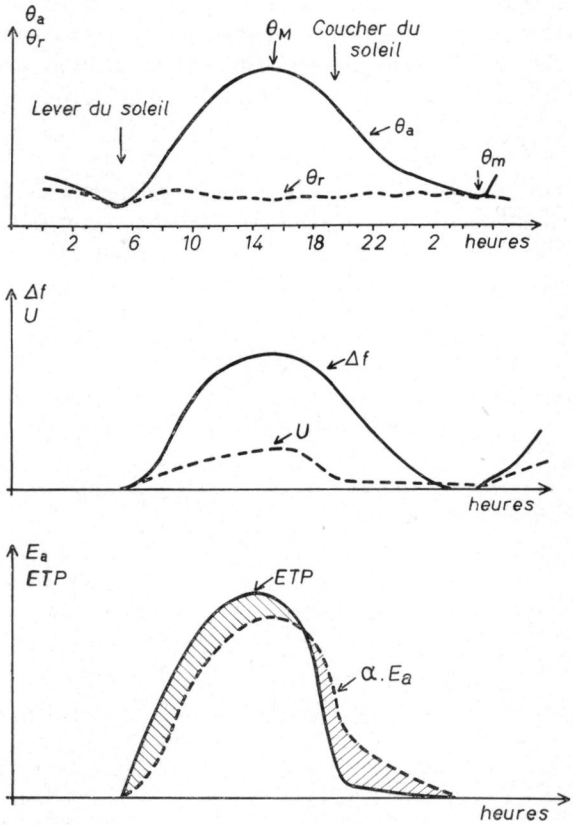


FIG. 10. — *Schéma donnant la variation quotidienne de ETP et de différents éléments du climat intervenant dans sa définition*

a) Variation de la température de l'air θa et du point de rosée θr.
b) Variation du déficit de saturation de l'air Δf et de la vitesse du vent.
c) Variation de α E_a ou de ETP. E*a* correspond à l'évaporation d'une surface d'eau libre maintenue à la température de l'air. Variation de ETP ; les surfaces hachurées se compensent autour de α E*a*.

(fig. 10). On remarque que αE_a fait intervenir l'indice d'évapotranspiration de la région (ε), le déficit de saturation Δf et la vitesse du vent. Ainsi, la variation de ETP au-cours de la journée peut se représenter en première approximation à partir du déficit de saturation et de la vitesse du vent. La formule de l'évaporation corrigée sous abri permet d'intégrer cette action du déficit de saturation et de la vitesse du vent. Ces valeurs instantanées de ETP sont donc accessibles au calcul dans les conditions naturelles, sans faire intervenir un matériel compliqué et peu répandu. Cette évaluation de ETP sera utilisée largement dans le quatrième chapitre.

Le calcul de ETP à partir des données sous abri se faisant jour après jour, il est possible d'évaluer les fluctuations de ETP sur une période de quelques jours seulement. On peut alors étudier les relations pouvant exister entre certains phénomènes physiques ou biologiques et l'évapotranspiration potentielle (cf. VERNET, 1963, GODARD, 1963).

L'utilisation d'un matériel simple devrait permettre de cartographier à un coefficient régional près ETP à une échelle de quelques centaines de mètres ou de quelques kilomètres en fonction des facteurs d'hétérogénéité par rapport à la loi générale (cf. BALDY, 1963). Ces hétérogénéités peuvent être dues à des couverts végétaux différents, à des accidents topographiques naturels ou artificiels (brise-vent), à des variations dans les réserves en eau utilisables du sol (profils pédologiques) intervenant sur le rapport $\frac{ETR}{ETP} = \varepsilon$.

En effet, si dans le chapitre I, on a insisté sur la dépendance de ETP climatique vis-à-vis des phénomènes de rayonnement à l'échelle régionale, on doit constater qu'à l'échelle agricole envisagée, l'évapotranspiration potentielle peut varier notablement comme le montre le tableau 4 qui établit une comparaison entre deux stations

TABLEAU 4

Évapotranspiration potentielle mesurée dans deux stations voisines
(Distance entre les stations 8-10 km)

Période	Versailles (C. N. R. A.) (mm)	La Minière (mm)
20 avril-31 mai (1962)	101	129
1er juin-5 juillet	123	210
6 juillet-2 août	96	127
3 août-30 août	96	154
31 août-4 octobre	78	119
5 octobre-1er novembre	36	53
20 avril-1er novembre (1962)	530	792

Versailles (C. N. R. A.) — Altitude 120 m — Zone de cultures diverses enclavées dans le parc boisé du château. Plan d'eau peu profond, étangs, limon.

La Minière — Altitude 160 m — Plateau dégagé, bien exposé aux vents dominants. Cultures diverses, céréales. Absence de forêt, limon profond.

Évapotranspiration potentielle mesurée dans chaque station sur 4 évapotranspiromètres identiques entourés d'un anneau de garde pour uniformiser les conditions de milieu.

distantes seulement de 10 km, mais situées dans des conditions de sol, couvert végétal et topographie différentes. La variation de 50 p. 100 dans ETP mesurée sur quatre mois ne serait traduite par aucune formule classique puisque ces deux stations présentent sensiblement la même température moyenne et la même radiation globale. On doit admettre que l'écart provient d'une ventilation et d'un indice ε différents.

Ainsi, dans les zones où ETR est susceptible de fluctuer, les exigences en eau des végétaux varient considérablement autour des valeurs moyennes de ETP telles qu'on peut les définir en utilisant les formules généralement admises. Non seulement, l'évapotranspiration potentielle varie d'une année sur l'autre pour une même période, comme le montre la figure 11, mais elle varie d'un point à un autre distant de quelques kilomètres par la simple introduction d'hétérogénéités intervenant sur la topographie, et sur l'évapotranspiration réelle par l'intermédiaire du couvert végétal et des réserves en eau du sol différentes.

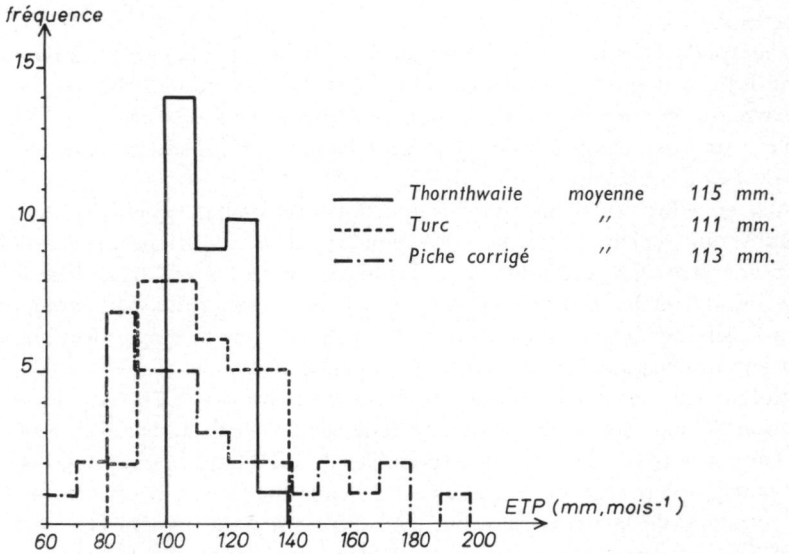


FIG. 11. — *Fréquence des ETP du mois de juillet à Versailles (France). Période* 1928-1962. *Calcul effectué à partir des formules* THORNTHWAITE, TURC, PICHE *corrigé.*

Pour cette dernière formule on a utilisé le coefficient $\alpha = 0{,}37$ établi sur la période 1958-1962. Ce coefficient conduit à surestimer ETP les années très sèches. On constate cependant une dispersion croissante en passant de la formule de THORNTHWAITE (température), à celle de TURC (radiation globale et température), au PICHE corrigé (déficit de saturations, vent, température).

Les valeurs réellement observées sur évapotranspiromètres ont été en juillet à Versailles : 1958, 72 mm ; 1959, 103 mm ; 1960, 76 mm ; 1961, 133 mm ; 1962, 102 mm.

CONCLUSION

L'évapotranspiration potentielle à l'échelle régionale est sous la dépendance étroite des phénomènes de rayonnement ; à l'échelle ponctuelle, l'influence de la vitesse du vent et du déficit de saturation devient déterminante. Dans ces conditions, il peut paraître paradoxal de chercher à évaluer l'évapotranspiration potentielle à

l'échelle de la turbulence, à partir de données recueillies sous abri. On a cependant montré en partant de la formule de PENMAN donnant ETP, qu'il existait des relations entre l'évaporation sous abri et ETP. Il devient alors possible d'évaluer cette dernière à partir de l'évaporation sous abri corrigée en fonction de la température de l'air (θ_a), du point de rosée (θ_r) et d'un indice d'évapotranspiration (ε) traduisant l'aridité de la région.

On trouve :

$$\mathrm{ETP} \# \alpha_0 \cdot E_p \cdot \frac{1 + \dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}}{1 + (1 - \varepsilon)\dfrac{L \cdot D \cdot F'(\theta)}{K \cdot \beta}}.$$

Cette formule ne fait appel, en dehors du terme ε, qu'à des données existant dans tous les postes météorologiques complets. Elle doit permettre d'approcher, avec une légère transformation $\mathrm{ETP} = \alpha \cdot (E_a)_{\mathrm{Piche}}$, les variations quotidiennes de ETP indispensables à connaître pour étudier la dynamique de l'eau à travers les végétaux.

La simplicité des mesures à effectuer devrait faciliter la cartographie des variations de ETP à une échelle correspondant aux dimensions des différentes cultures. Cette cartographie serait envisagée non seulement pour définir les besoins en eau maximaux imposés par le climat, mais également pour juger son influence sur l'efficience de l'eau consommée.

On a en effet remarqué que l'évapotranspiration potentielle ne se présentait pas comme une valeur uniforme correspondant aux conditions idéales définies au premier chapitre ; les accidents topographiques naturels ou artificiels, le type de couvert végétal et les réserves en eau du sol liées aux profils pédologiques, contribuent à diversifier les évapotranspirations réelles et par là même, les évapotranspirations potentielles autour de la valeur moyenne régionale.

Étant donné les conséquences de cette variation de ETP sur le niveau de production de matière sèche, il semble indispensable au stade de la recherche, de mieux connaître toutes les variations possibles de ETP dans le temps ou dans l'espace si l'on veut pouvoir agir non seulement sur l'eau consommée mais sur son efficience. Enfin, au stade de la production, le bilan hydrique local pourra être serré de plus près en évitant des erreurs qui peuvent être importantes sur le terme ETP pris à cette échelle plus réduite.

Quatrième Chapitre

ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE ET PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE.

AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION PAR L'ABAISSEMENT DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Introduction

L'évapotranspiration potentielle représente la quantité d'eau maximale susceptible d'être perdue par un couvert végétal continu sous un climat donné. L'énergie disponible est alors le seul facteur limitant de l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration réelle est évidemment inférieure ou égale à ETP, puisqu'elle est susceptible de faire intervenir un grand nombre d'autres facteurs limitants. Dans ces conditions, on conçoit que la quantité comme d'ailleurs la qualité de la matière sèche produite par un végétal soit une fonction des relations existant entre ETR et ETP.

Dans un premier chapitre, on a montré comment, à partir de certaines hypothèses simplificatrices, ETP pouvait se déterminer au niveau d'une région en fonction des données de rayonnement et de ETR, c'est-à-dire de l'aridité.

Dans le deuxième chapitre, on a vu qu'à échelle fine, au niveau de la feuille, l'évapotranspiration potentielle instantanée était presque toujours très supérieure à l'évapotranspiration réelle. Cet écart entre ETP et ETR traduisait des réactions de défense du végétal qui contribuaient à limiter son activité photosynthétique par rapport aux possibilités offertes par le milieu. Il en résultait que ETP à cette échelle intervenait également comme facteur limitant, sur l'efficience de l'eau consommée.

Enfin, dans le troisième chapitre, on proposait une formule climatique permettant d'évaluer les variations de ETP au cours du temps et dans l'espace. En effet, si au niveau d'une région, ETP ne peut varier comme les phénomènes de rayonnement que dans des limites assez étroites, il n'en est pas de même à échelle plus réduite.

Étant donné le rôle de ETP non seulement sur la consommation d'eau, mais sur son efficience, on dispose d'un moyen d'étudier ces variations de ETP et de juger 'influence de celles-ci sur la circulation de l'eau.

Nous présenterons tout d'abord un schéma synthétique pour étudier les différents facteurs qui interviennent dans la dynamique de l'eau au niveau de la plante. On sera amené à rappeler un certain nombre de définitions concernant ETP à différentes échelles. Ce schéma permettra non seulement d'interpréter un certain nombre de faits agronomiques, mais surtout de dégager quelques possibilités d'action concernant l'amélioration de la productivité de l'eau consommée. On proposera ensuite un certain nombre de conclusions qui porteront soit sur la « Méthodologie » en ce qui concerne l'étude du facteur « eau », soit sur le sens à donner aux modifications du climat au niveau des cultures (brise-vent, cultures associées, irrigations, oasis). Enfin, on cherchera à définir les limites de cette action sur l'efficience de l'eau, compte tenu des limites possibles d'action sur le milieu envisagées dans le premier chapitre.

I. — Représentation schématique de l'évapotranspiration des végétaux

La'limentation hydrique des végétaux étant sous la dépendance d'un grand nombre de paramètres, il a semblé utile de les regrouper par familles (climat, sol, plante) dans une représentation schématique ; celle-ci ne prétend pas traduire tous les cas possibles, elle doit seulement aider à mieux comprendre des phénomènes fugitifs et très souvent liés les uns aux autres.

a) *Rappel des définitions de ETP à différentes échelles*

On a vu dans les chapitres précédents que l'évapotranspiration potentielle ne faisait intervenir que l'énergie comme facteur limitant. Cependant, on a pu suivre les modifications que subissait cette définition en apparence simple lorsque l'on changeait d'échelle (fig. 12).

Au niveau de la feuille, on a défini une ETP ponctuelle et instantanée qui correspond à l'évaporation d'une surface liquide sans rebord (exemple pastille « Piche » imbibée d'eau) ou, sensiblement, à la transpiration d'une même surface foliaire quand les stomates sont très largement ouverts. Cette ETP ponctuelle dépend évidemment du coefficient de forme et de dimension, de l'albédo et des facteurs du milieu ; le déficit de saturation et la ventilation jouent, dans ce cas, un rôle essentiel.

A l'échelle de la plante, on peut définir une ETP qui correspondrait soit à l'évaporation de surfaces liquides ayant les mêmes formes ou dimensions que le feuillage, soit à un feuillage aux stomates largement ouverts. Cette ETP que l'on appellera locale dépendra évidemment de l'importance des surfaces d'échange par rapport à la surface du terrain (indice foliaire dans le cas des végétaux ou *leaf area index* L. A. I.). L'ETP locale n'est pas un simple multiple de ETP ponctuelle. En effet, l'énergie consommée ne peut provenir que des phénomènes de rayonnement et des effets advectifs. Si ces derniers peuvent être, dans certains cas, sensiblement proportionnels à la surface du végétal, il n'en est pas de même des phénomènes de rayonnement. Si l'on désigne par i l'indice foliaire ou L. A. I., le produit par i de ETP ponctuelle sur une verticale sera supérieur à l'ETP locale de l'ensemble.

$$i \cdot \mathrm{ETP}_{\text{ponctuelle}} > \mathrm{ETP}_{\text{locale}}. \qquad \text{(IV, 1)}$$

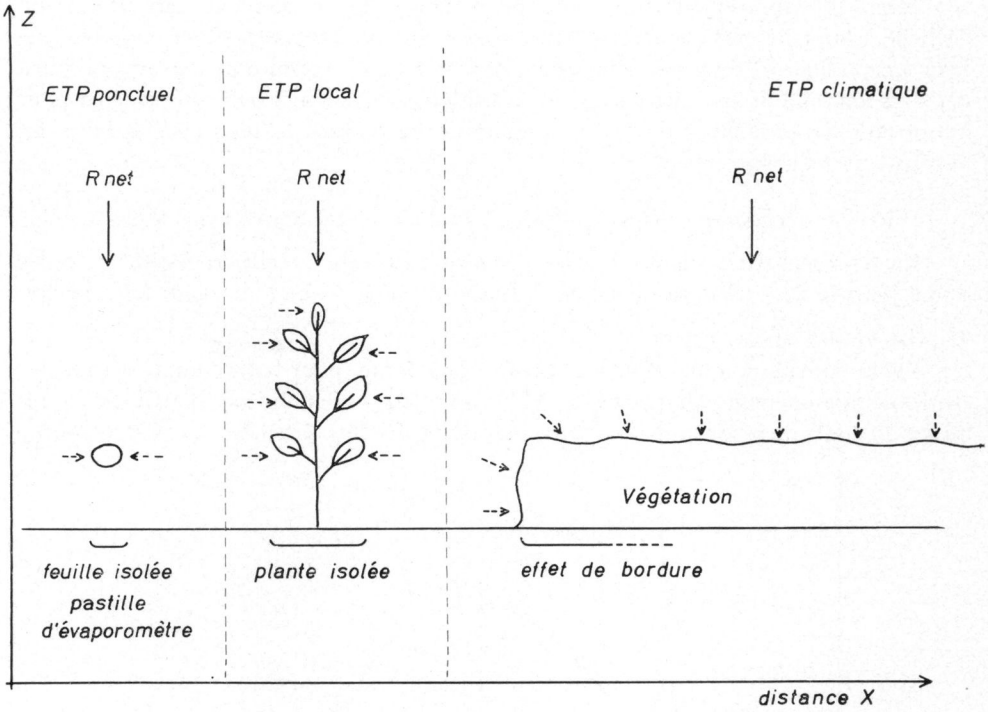


FIG. 12 — *Définition de ETP à l'échelle ponctuelle, locale, climatique. Les trois cas schématiques envisagés correspondent à : la feuille, la plante, le couvert végétal continu. Le rayonnement net* Rn *est le même dans les trois cas par unité de surface du terrain. Les effets advectifs d'énergie sont symbolisés par les flèches en pointillé.*

Lorsque l'on place des végétaux côte à côte, la part advective ramenée à l'unité de surface du terrain tend à décroître. Ainsi, ETP locale va diminuer au fur et à mesure que la surface portant un couvert végétal considéré augmente. On passera avec toutes les graduations possibles de ETP locale à ETP climatique définie dans le premier chapitre. Ainsi, ETP locale présentera des valeurs plus importantes que ETP considérée généralement à partir des formules climatiques.

On a donc finalement un ordre de classement qui sera le suivant, en partant de ETP ponctuelle au niveau de la feuille pour aboutir à l'ETP climatique :

$$i \cdot \mathrm{ETP}_{\text{ponctuelle}} > \mathrm{ETP}_{\text{locale}} > \mathrm{ETP}_{\text{climatique}}. \qquad \text{(IV, 2)}$$

Ainsi, dans une zone non homogène (couvert végétal, type de sol au point de vue réserves en eau utilisables), les ETP locales fluctueront d'un point à un autre même très voisin. Le cas d'hétérogénéité le plus marqué est constitué par un périmètre irrigué en zone aride. ETP locale diminue du bord du dispositif vers le centre. En ce dernier point, lorsque la zone irriguée présente une surface suffisante comprise entre les échelles de turbulence e_2 et de convection e_3 (voir définitions chapitre I, page 748) on a $\mathrm{ETP}_{\text{locale}} = \mathrm{ETP}_{\text{climatique}}$. Si la zone irriguée s'accroît, le climat tel qu'on le définit en météorologie sous abri à 2 m se trouve plus ou moins perturbé et $\mathrm{ETP}_{\text{climatique}}$ tend à s'abaisser.

Ainsi, l'évapotranspiration potentielle varie de manière importante selon l'échelle à laquelle on la considère. On a également vu dans le premier chapitre que pour une échelle déterminée, elle pouvait varier dans un rapport extrême de un à deux en fonction de l'aridité de la zone considérée. On va utiliser ces propriétés pour interpréter les problèmes de la dynamique de l'eau dans la plante et étudier les moyens d'action sur celle-ci.

b) *Représentation schématique de l'évapotranspiration réelle du végétal*

La représentation schématique de l'évapotranspiration réelle du végétal au cours d'une journée de 24 h sera faite aux différentes échelles que l'on vient de rappeler.

1°) *Au niveau de la feuille.*

On a montré qu'à un coefficient près, voisin de un, pour tenir compte des phénomènes de rayonnement (chapitre III), ETP ponctuelle et instantanée pouvait se représenter au cours de la journée à partir de la formule ETP $= \alpha E_a$ (fig. 10). Cette courbe

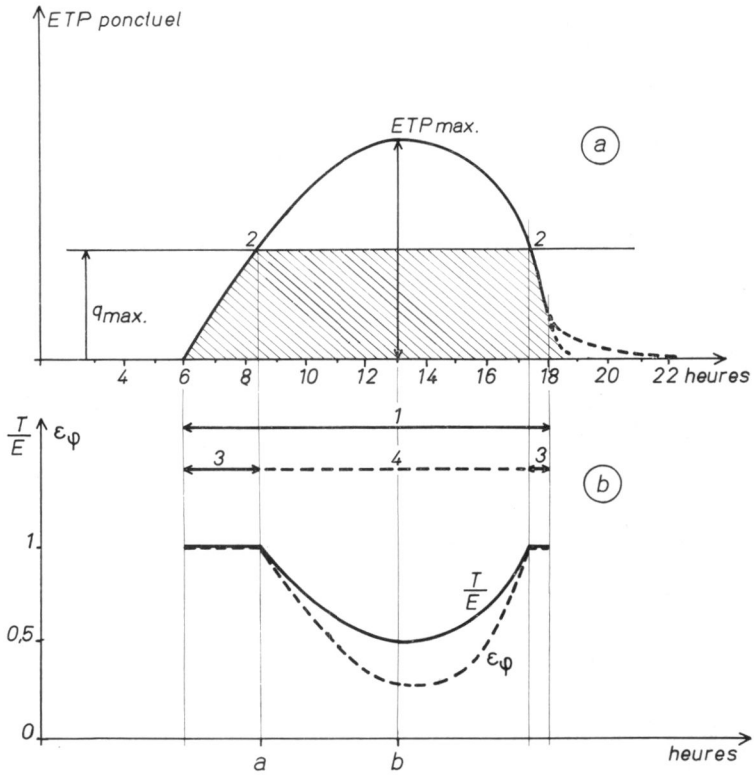


FIG 13. — *Schéma donnant les évapotranspirations réelle et potentielle durant la journée au niveau de la feuille*
a) Représentation de la demande en eau ETP imposée par le climat. L'évolution de ETR au cours du temps est limitée à la valeur maximum du débit q max (surface hachurée).
b) Représentation de l'évolution de l'évapotranspiration relative brute $\varepsilon = \frac{E}{T}$ et corrigée ε_φ.
1 — Durée possible d'ouverture des stomates (phase diurne, exemple 12 h).
2 — Intervention de la régulation stomatique et cuticulaire q max = ETP.
3 — Durée pendant laquelle ETR = ETP ; stomates très ouverts.
4 — Durée pendant laquelle ETR $\leqslant$ q max ou q max $<$ ETP. Régulation stomatique et cuticulaire dont la sévérité est traduite par ε_φ.

représente la « demande » maximale en eau imposée par le climat (fig. 13 *a*).

De son côté, la feuille assure un certain débit d'eau. L'analyse des facteurs qui interviennent dans ce débit sera faite ci-dessous. Étant donné les faibles réserves en eau de la feuille, le flux liquide peut être considéré comme conservatif. Ce débit correspond sensiblement à la transpiration cuticulaire et stomatique de cette feuille. On admettra l'existence d'un débit q_{max}. Cette hypothèse est justifiée par les mesures effectuées par différents auteurs et notamment de PARCEVAUX (cf. chapitre III et IV) et elle est explicable à partir des données de HALLAIRE sur la circulation de l'eau dans le sol en régime de dessèchement (cf. potentiel efficace, 1963, chapitre IV)

Tant que ETP ponctuelle et instantanée est supérieure à q_{max}, les stomates restent largement ouverts si les autres facteurs [1], lumière et CO_2 notamment, sont favorables ; durant cette période, ETR est limitée par l'énergie disponible, on a donc : ETR = ETP.

Quand ETP ponctuelle devient supérieure à q_{max}, la feuille tend à se dessécher. On a intervention de la régulation stomatique et plus ou moins parallèlement de la régulation cuticulaire. Avec une inertie variable selon les plantes et les conditions de milieu, ETR « décroche » par rapport à ETP. Dans les meilleures conditions, ETR se maintiendra constante au niveau du débit maximum.

Quand ETP diminuera et sera à nouveau inférieure à q_{max}, la feuille aura tendance à se réhumecter, le processus de régulation inverse aura lieu. Si les autres facteurs photiques sont favorables, l'ouverture des stomates permet d'avoir de nouveau l'égalité entre ETR et ETP.

Ainsi, la position relative de q_{max} et de ETP_{max} au cours de la journée va définir d'une part, la durée plus ou moins longue de la régulation stomatique et cuticulaire, d'autre part l'intensité de cette régulation.

Cette intensité des phénomènes de régulation est donnée par la transpiration relative, $\frac{ETR}{ETP} = \varepsilon$ (cf. de PARCEVAUX, 1963). rapport entre la transpiration ($ETR \leqslant q_{max}$) et l'évaporation ($ETP_{\text{ponctuelle instantanée}}$). On a vu au chapitre III (pages 779 à 781) que pour obtenir une évaluation exacte de la régulation stomatique et cuticulaire (terme ε_φ), il était nécessaire de corriger la transpiration relative (ε) pour tenir compte de l'interaction de la température sur ces phénomènes. On a donc représenté sur la figure 13 *b*, l'évolution schématique au cours du temps de la transpiration relative $\varepsilon = \frac{ETR}{ETP}$ et de ε_φ.

Or, les échanges gazeux (oxygène, gaz carbonique) qui conditionnent en partie l'activité photosynthétique de la plante sont évidemment affectés par la régulation stomatique et cuticulaire. La diminution diurne de ε_φ traduit donc au niveau de la feuille une augmentation des résistances à la circulation des fluides (eau, CO_2 et O_2). Cet « isolement relatif » par rapport au milieu extérieur, entraîne, toutes autres conditions restant égales, une diminution d'activité photosynthétique. On a tenté de donner dans le troisième chapitre une estimation approchée de l'élaboration de matière sèche, en fonction de ε_φ et des facteurs du milieu (équation II, 65). On constate qu'au moment où ETP est maximum, ε_φ est minimum. Même si les conditions de lumière et de température étaient les mêmes en (*b*) qu'en (*a*), l'activité photosynthétique diminuerait par suite du freinage des échanges gazeux

[1] Facteurs photiques — cf. de PARCEVAUX — pages 689 à 691.

traduit par ε_φ. Or, généralement, en (*b*), les conditions climatiques (θ, R*g*) sont plus favorables à l'activité photosynthétique. La dépression dans l'élaboration de matière sèche au milieu de la journée doit être plus faible que ne le laisse prévoir ε_φ. Cependant, ε_φ traduit la réduction relative par rapport aux possibilités offertes par le milieu climatique à l'instant considéré.

On constate donc qu'au niveau de la feuille, le déséquilibre existant entre q_{max} et ETP_{max} est susceptible de limiter indirectement la photosynthèse durant les heures les plus chaudes et les plus lumineuses de la journée.

Les nombreuses mesures de transpiration instantanée (cf. de PARCEVAUX, 1963) montrent que ce déséquilibre est la règle même en régions subhumides avec des sols qui présentent de fortes réserves en eau et dans des conditions climatiques très moyennes. On note surtout que T/E au moment du maximum de ETP descend à des valeurs très voisines de 0,2 ou 0,3. Cette transpiration relative correspond à des termes ε_φ de 0,1 à 0,2. Les échanges gazeux de la feuille avec le milieu extérieur peuvent donc être réduits à 10 ou 20 p. 100 de leur valeur maximale par le jeu de la régulation stomatique ou cuticulaire. En outre, celle-ci intervient très souvent durant des périodes qui représentent plus des 3/4 de la durée de la phase diurne.

Nous insisterons sur le fait qu'il s'agit d'un phénomène général observé sous des climats très variés avec des végétaux d'espèces diverses, cultivés selon des techniques très différentes. Il se manifeste sans flétrissement apparent du feuillage ; il est, comme on vient de le voir, intense et souvent très prolongé dans la journée. Les plantes cultivées ont donc, par suite de cette régulation hydrique, leurs échanges gazeux freinés durant la plus grande partie de leur vie active. On en devine toutes les conséquences possibles quant au niveau de production de matière sèche.

2°) *Au niveau de la plante et du couvert végétal.*

Quand on passe de l'échelle de la feuille à celle de la plante, puis à l'échelle du couvert végétal continu, on a vu que ETP diminue relativement, alors que les surfaces foliaires se multiplient. On peut de nouveau utiliser la même représentation schématique avec la demande en eau légèrement accrue par rapport à ETP ponctuelle et une offre en eau multipliée par l'indice foliaire (fig. 14). Les combinaisons possibles varient à l'infini. Les ETP aux différents niveaux du feuillage ne sont pas semblables (vent, déficit de saturation, rayonnement) ; les dimensions des feuilles changent (coefficient de forme et de dimension) ainsi que les conditions d'alimentation hydrique qui diffèrent à chaque niveau de feuillage. Cependant, ce schéma aide à comprendre comment, en partant d'une transpiration relative très inférieure à un, au niveau de la feuille, on peut obtenir à l'échelle de la plante, une transpiration relative (ETR/ETP) locale beaucoup plus élevée et au niveau du couvert végétal, une transpiration relative (ETR/ETP) égale à un.

Ainsi, la multiplication des ETR ponctuelles, pourtant très faibles, conduit grâce à l'indice foliaire, à une ETR locale ou climatique qui peut être importante et voisine de ETP climatique. On remarque cependant que cette valeur de ETR climatique est obtenue surtout à partir d'une transpiration qui fait intervenir systématiquement la régulation stomatique et cuticulaire. Il en résulte même que lorsque la plante ou le couvert végétal présentent un rapport ETR/ETP = ε voisin de un, on ne doit pas en déduire que cette plante ou ce couvert végétal sont dans d'excellentes conditions physiologiques. En effet, ce résultat n'est obtenu qu'avec la mul-

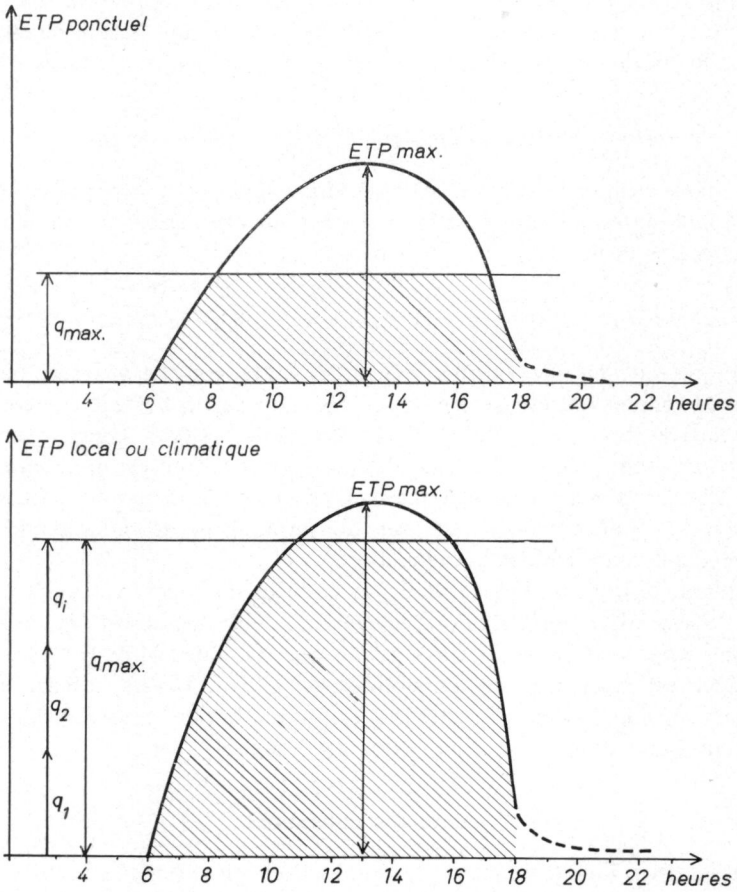


FIG. 14. — *Schéma montrant l'augmentation de ETR et de ETP lors du passage de l'échelle ponctuelle au niveau de la feuille à l'échelle locale de la plante ou climatique du couvert végétal continu. Chaque débit q correspond à un niveau de feuillage ; i désigne l'indice foliaire.*

tiplication d'un feuillage qui, à chaque niveau, subit un déséquilibre hydrique invisible traduit par $\varepsilon_\varphi < 1$. On examinera plus loin les conséquences de ce divorce de la transpiration relative prise à des échelles différentes, d'une part, sur la méthodologie pour mesurer ETP et d'autre part, sur l'efficience de l'eau consommée par les végétaux.

On reprendra donc les conclusions de l'étude à échelle fine. L'alimentation hydrique d'un couvert végétal doit être envisagée schématiquement comme un équilibre ou un déséquilibre entre l' « offre » en eau que peut assurer le végétal à partir des réserves disponibles dans le sol et une « demande » imposée par le climat. Le déséquilibre (ETR < ETP) traduit une résistance à la circulation de l'eau qui s'accompagne parallèlement d'une augmentation de la résistance aux échanges gazeux puisque les trajets sont les mêmes. Cette diminution des échanges gazeux est susceptible de limiter l'activité photosynthétique. L'égalité ETR = ETP traduit des conditions globalement meilleures que les précédentes, mais ne signifie pas que le

couvert végétal se soit trouvé dans les conditions optimales pour assurer les échanges gazeux avec l'extérieur. Il doit donc exister des possibilités, même dans le cas où ETP = ETR (locale ou climatique), d'améliorer la production de matière sèche.

II. — Interprétation de faits agronomiques

Nous allons utiliser le schéma proposé, d'une part pour interpréter un certain nombre de faits agronomiques et d'autre part, pour étudier les voies d'amélioration de l'efficience de l'eau.

a) *Production de matière sèche en fonction de ETR et ETP*

Quelle que soit l'échelle considérée (feuille, plante, couvert végétal), on constate que l'activité photosynthétique sera plus ou moins directement limitée selon la position relative de q_{max} et de ETP_{max}. Ces deux valeurs vont jouer un rôle essentiel pour déterminer le niveau de production. Tout le problème agricole consistera donc à amener l'offre à être au niveau de la demande maximum ($q_{max} = ETP_{max}$). On pourra jouer soit sur les paramètres qui commandent l'offre, soit sur ceux qui commandent la demande.

Cependant, le problème ne se pose pas de la même façon à chaque échelle.

Si, ETR est inférieure à ETP à l'échelle de la culture, on est sûr qu'au niveau du feuillage intervient la régulation stomatique ou cuticulaire, la production de matière sèche est inférieure aux possibilités du milieu. Divers auteurs ont établi des relations entre le rapport ETR/ETP et la production de matière sèche. Celles-ci se présentent souvent sous la forme (Robelin, 1963) :

$$M = -a + b.\varepsilon \qquad \text{(IV, 2)}$$

a et b étant des constantes

Généralement, l'augmentation de production est alors recherchée par une augmentation de ETR. Le problème des irrigations de base ou de complément relève de cette préoccupation. On voit cependant que l'on pourrait également obtenir le même résultat en diminuant ETP.

Lorsque ETR = ETP à l'échelle du champ, on ne doit pas conclure que l'on se trouve à l'optimum de production comme on l'admet très généralement. Nous avons en effet remarqué le déséquilibre quotidien très important existant au niveau de la feuille. Dans ce cas, il est impossible d'augmenter ETR aux différentes échelles puisque l'on est limité par l'énergie disponible à plus grande échelle ($ETR_{climatique} = ETP_{climatique}$). Il ne reste donc plus que la possibilité d'abaisser ETP climatique pour rapprocher ETR de ETP au niveau de la feuille.

Finalement, on voit que pour obtenir l'efficience maximale de l'eau, il faut que ETR soit égale à ETP à toutes les échelles. Évidemment, $ETR_{climatique} = ETP_{climatique}$ est une condition nécessaire. Elle n'est pas suffisante ; on doit tendre vers $ETR_{ponctuelle} = ETP_{ponctuelle}$. Cette condition ne pouvant pas être réalisée par une augmentation de ETR ponctuelle, doit être recherchée par une diminution de ETP. Dans tous les cas, il est donc avantageux de réduire ETP aux différentes échelles non seulement pour diminuer la consommation d'eau mais surtout pour augmenter son efficience.

L'influence de la diminution de ETP_{max} sur la production de matière sèche est particulièrement illustrée par l'expérience rapportée par ailleurs (BOUCHET, de PARCEVAUX, 1963) et par les résultats de STANHILL (fig. 15) qui montrent que pour une même $ETP_{climatique}$ de 500 mm, la production de matière sèche augmente

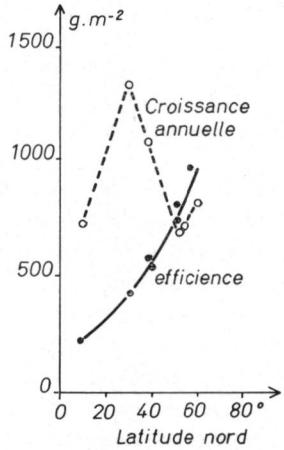


FIG. 15. — *Variation de la production de matière sèche en fonction de la latitude pour une même évapotranspiration potentielle de 500 mm d'après* STANHILL

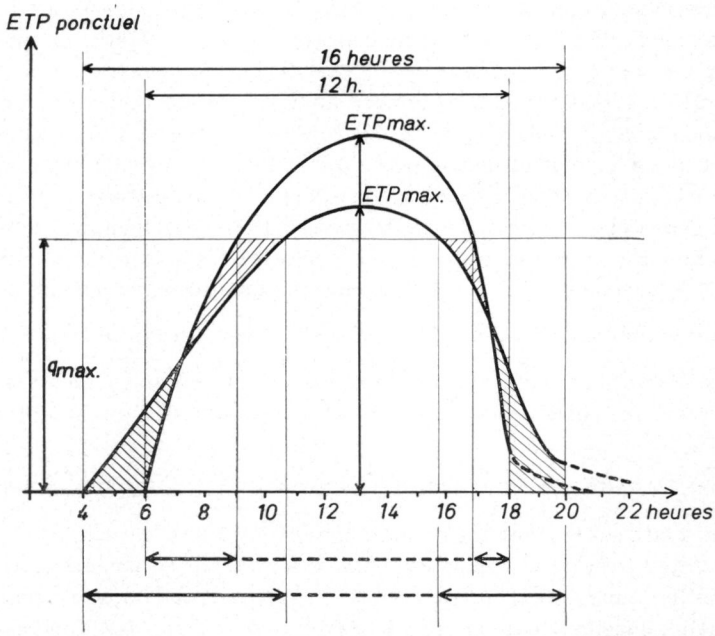


FIG. 16. — *Schéma montrant l'influence de la durée du jour pour une même ETR (même débit q_{max}, même surface hachurée en plus et en moins dans les 2 cas) sur la durée et l'intensité de la régulation stomatique et cuticulaire. Influence sur la durée — ex : durée du jour 12 h ; 3 h sans régulation — 9 h avec régulation ; durée du jour 16 h ; 10 h 50 sans régulation — 5 h 10 avec régulation (régulation moins intense que dans le cas précédent).*

quand on passe des latitudes basses (équateur) aux latitudes élevées (Stockholm 60°). Cette très forte variation de production s'explique aisément à partir du schéma déjà présenté figure 16. La durée du jour plus longue des latitudes élevées conduit pour une même ETP quotidienne à une ETP_{max} nettement plus faible à Stockholm qu'à l'équateur. Avec un même débit maximum, il est alors possible de justifier de très grands écarts dans l'activité photosynthétique. Ces conclusions se trouvent encore renforcées si l'on tient compte du fait que la radiation globale et la température, pour une assez longue période, sont plus faibles à Stockholm qu'à l'équateur.

b) *Paramètres commandant l'offre maximale* (q_{max})

Pour permettre l'interprétation de quelques faits agronomiques, il est indispensable de préciser les paramètres qui agissent sur le débit maximum en eau d'un végétal (q_{max}). La régulation stomatique et cuticulaire qui commande le débit d'eau dépend du potentiel thermodynamique de l'eau au niveau des stomates et des cellules épidermiques. Or, celui-ci est fonction du potentiel très variable existant dans la couche limite (facteur climatique) et du potentiel peu variable au sein de la feuille. Le flux liquide pouvant être considéré comme conservatif, le potentiel de l'eau au niveau des cellules superficielles de la feuille dépend également du potentiel de l'eau dans le sol. HALLAIRE a montré, en introduisant la notion de potentiel efficace (cf. 1963, chapitre IV) que celui-ci ne devait pas être pris au sens statique mais dynamique. Tout se passe comme si un sol en voie de desséchement était plus sec que ne le laisse supposer son humidité, la sécheresse relative étant d'autant plus sévère que la vitesse de desséchement est intense. Ainsi le débit q_{max} n'est pas indépendant de la demande ETP et l'on peut même concevoir que ce débit q_{max} puisse tendre à diminuer au cours de la journée par suite de l'accroissement du desséchement. La formule IV-4 (HALLAIRE, 1963) permet d'analyser l'influence des différents facteurs. On voit cependant que si la vitesse de desséchement intervient pour limiter le débit à une valeur q_{max}, le débit lui-même sera d'abord une fonction de l'état des réserves en eau du sol [potentiel ψ (H)]. Il va donc dépendre des possibilités du sol comme réservoir d'eau. Celui-ci sera, compte tenu des profils pédologiques, fonction de la gamme d'humidité utile à chaque niveau, comprise entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Le développement radiculaire, l'accroissement quotidien des racines fonctionnelles traduit par le terme $\left(\frac{L}{M}\right)$ définira l'importance de la réserve d'eau utilisable et son évolution au cours du temps ; enfin, le bilan, pluie moins évapotranspiration potentielle, conditionne les possibilités de réalimentation du réservoir « sol ».

Tous les facteurs que l'on vient d'examiner (H, $\frac{dH}{dt}$, système radiculaire) sont susceptibles d'agir sur le débit q_{max} pour le faire varier dans les conditions naturelles dans des limites très larges qui vont d'une valeur nulle en zone désertique ou sur un sol desséché à une valeur importante de l'ordre de 7 à 8 mm · j^{-1} pour certaines plantes irriguées. Cette variation de q_{max} permet de passer des conditions limites de survie des végétaux aux conditions optimales de production avec toutes les gradations possibles. En effet, le même débit q_{max} sera plus ou moins efficient au point de vue production de matière sèche selon les valeurs de ETP (figure 17). On

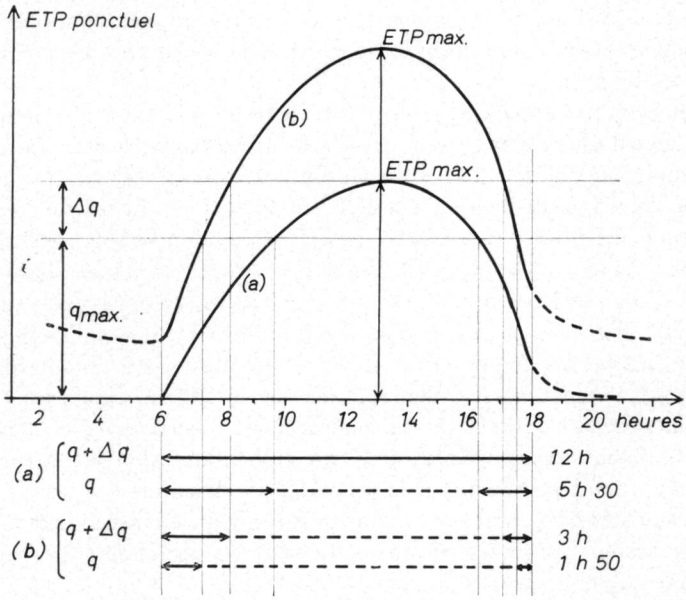


FIG. 17. — *Schéma montrant l'interaction des variations de ETP (demande climatique) et de* qmax *(offre en eau) sur la durée et l'intensité de la régulation stomatique et cuticulaire.*

Le cas (*a*) correspondrait à l'évolution de ETP en zone humide (point de rosée voisin de la température minimum).

Le cas (*b*) représenterait une zone plus sèche (le déficit de saturation n'est pas nul en fin de nuit). ETP max est 60 p. 100 plus élevée que dans le cas précédent.

Le débit qmax peut correspondre à un certain état des réserves en eau du sol ou à un type de système radiculaire. Le débit $q + \Delta q$ traduirait de meilleures réserves en eau (irrigation par exemple) ou un sytème radiculaire plus efficace. Δq représente 35 p. 100 de qmax.

La durée sans régulation stomatique et cuticulaire varie de 1 h 30 à 12 h. L'intensité de la régulation est elle-même très variable. Une même amélioration du débit Δq (irrigation, système racinaire) correspond à un allongement de la durée sans régulation de 6 h 30 (5 h 30 à 12 h) dans le cas (a) et de 1 h 10 (1 h 50 à 3 h) dans le cas (*b*). L'intensité de la régulation est plus grande dans le cas (*b*).

ne peut donc pas isoler l'étude de l'offre sans considérer parallèlement l'étude de la demande.

c) *Exemples agronomiques*

Connaissant les paramètres qui agissent sur le schéma « offre-demande », il est alors possible d'interpréter quelques résultats culturaux.

L'olivier, en zone prédésertique, planté à grande distance, présente un système radiculaire à étage ou à développement en volume (cf. VERNET, 1961 ; VERNET et DAMAGNEZ, 1963) lui permettant d'utiliser au maximum les pluies sur un impluvium plus important que sa surface d'occupation aérienne. La pluie utilisée sous forme de transpiration ne représente d'ailleurs qu'une partie de ETR. Bien que l'ETP locale soit élevée en raison des effets de bord très importants entre les arbres, le rapport impluvium-surface occupée par les arbres est favorable et le débit q_{max} peut atteindre une valeur non négligeable. Par ailleurs, le feuillage présente des caractères de xérophytisme qui tendent à freiner les pertes d'eau dues à l'augmentation relative de ETP locale (albédo, orientation des feuilles, cuticule épaisse, pilosité). Ainsi, avec la représentation schématique proposée, l'augmentation rela-

tive du point de vue demande climatique (ETP_{max}) se trouve compensée par l'augmentation beaucoup plus importante de l'offre (q_{max}) ; l'olivier peut ainsi survivre et même assurer une production de matière sèche non négligeable dans des conditions très sévères.

Une situation, en apparence toute différente et pourtant analogue, sera celle de jeunes plants d'un semis en ligne espacées ou en poquets situé même dans des régions subhumides. En effet, l'ETP locale pourra être très élevée car, après la formation d'une croûte desséchée ou « mulch » à la surface du sol, le jeune plant se trouvera à son échelle dans un véritable désert où les micro-effets de bord ou d'oasis sont importants. Par contre, à la différence de l'olivier, la jeune plante ne dispose pas toujours d'un système radiculaire suffisamment développé pour subvenir à la demande climatique en eau. Ainsi, malgré l'humidité du sol en dessous du mulch, le débit q_{max} reste relativement faible. Enfin, les jeunes tissus en voie de croissance présentent généralement une cuticule mince et la petite dimension des feuilles contribue à augmenter l'intensité des phénomènes d'échange avec l'extérieur (cf. chapitre II, l'influence du coefficient de forme et de dimension sur la transpiration). Tous ces facteurs tendent à modifier le rapport offre-demande des jeunes plants dans un sens souvent très défavorable et à limiter fortement les possibilités d'élaboration de la matière sèche. Ainsi, malgré un sol humide en profondeur, les jeunes plants traversent une période particulièrement difficile.

Les techniques du jardinage tendent à rétablir l'équilibre hydrique et à « forcer la plante ». Le semis en pépinière est un moyen de placer chaque plante dans une zone ou les ETP locales et ponctuelles seront abaissées par l'évapotranspiration réelle de la plante voisine. De même, les « bassinages » fréquents sur des sols pour lesquels les phénomènes d'asphyxie ne sont pas à craindre, permettent d'assurer un débit q_{max} élevé tout en abaissant $ETP_{ponctuelle}$ grâce à l'évaporation directe de l'eau sur un feuillage maintenu presque toujours humide. Ce déplacement de l'équilibre offre-demande qui réduit le rôle de la régulation stomatique et cuticulaire, améliore la croissance. Les techniques agricoles devraient donc tendre, pour les jeunes plantes, à modifier ce rapport offre-demande en eau qui est généralement très défavorable dans les conditions naturelles.

Une expérience rapportée par PETINOV, 1961, sur le théier en Azerbaïdjan (cf. de PARCEVAUX, 1963) peut s'expliquer également à partir du schéma déjà présenté. Un témoin donna une récolte de 1,5 t par hectare en utilisant l'eau du sol ; un deuxième traitement avec deux irrigations quotidiennes par aspersion fournit 4 t par hectare. On peut admettre que ce traitement évitait le desséchement du sol, réduisait ETP par une légère évaporation directe et améliorait le débit q_{max}. Un troisième traitement fournit une récolte de 10 t par hectare avec une même dose d'irrigation quotidienne mais avec des intervalles de temps de 15 minutes entre les irrigations. Ce traitement ne fit qu'abaisser ETP à l'échelle de la feuille car l'eau resta pratiquement sur le feuillage et ne modifia pas q_{max}. Il ressort de cet essai que l'eau servant à abaisser ETP, sans passer par la plante, a été aussi efficiente sinon plus que l'eau servant à augmenter q_{max} en passant à travers la plante. On notera cependant que ce résultat n'est valable qu'avec une plante arbustive qui, grâce à son système radiculaire, est déjà susceptible d'avoir sans irrigation un débit q_{max} non négligeable pour assurer son alimentation minérale comme le montre d'ailleurs le rendement de 1,5 t sur le témoin.

Une interprétation analogue peut être avancée pour les rendements plus élevés observés sur des palmiers d'oasis situés à l'est par rapport à ceux situés à l'ouest (cf. BALDY, 1963). Le matin, l'ETP instantanée est plus faible que le soir pour une même hauteur du soleil. En effet, le déficit de saturation de l'air est plus important dans ce dernier cas. A radiation globale équivalente, la plante utilise mieux celle-ci le matin que le soir, par suite d'une régulation stomatique ou cuticulaire moins intense due à des ETP instantanées plus faibles.

L'amélioration du rendement de l'oasis avec la multiplication des étages de végétation (luzerne, culture maraîchère), s'interprète également par une diminution de ETP ponctuelle à chaque niveau de végétation. L'association culturale ainsi réalisée permettrait d'ailleurs de bénéficier au maximum des différents niveaux d'éclairement, ce que l'on n'arrive pas toujours à obtenir avec une culture homogène lorsque l'on augmente la densité de peuplement pour augmenter l'indice foliaire.

Le schéma proposé (« offre-demande »), malgré son caractère en partie arbitraire, permet donc d'interpréter un certain nombre de faits agronomiques complexes et confirme ainsi sa validité.

On a vu que lorsque l'eau était disponible en quantité limitée (ETR < ETP), on devait chercher à augmenter le débit maximum (q_{max}) en jouant sur les réserves en eau du sol (impluvium, système radiculaire) et sur les réactions de défense de la plante (caractère xérophytique). Dans certains cas limites comme l'olivier, il est apparu plus intéressant d'accepter une demande en eau (ETP_{max}) très élevée et d'agir sur l'offre (q_{max}). Cet aspect de l'alimentation en eau est celui des cultures en zone sèche pour lesquelles $ETR_{climatique}$ est très inférieure à $ETP_{climatique}$ Quand on peut obtenir $ETR_{climatique} = ETP_{climatique}$, soit grâce à la bonne mobilisation des réserves en eau du sol, soit grâce aux pluies ou irrigations, l'augmentation de la production et l'amélioration de la productivité de l'eau ne peuvent être obtenues qu'en abaissant ETP et en augmentant l'indice foliaire.

III. — MÉTHODOLOGIE ET VOIES D'AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE DE L'EAU

Le schéma proposé et les faits agronomiques rapportés suggèrent non seulement les moyens d'amélioration à l'efficience de l'eau par des modifications climatiques, mais également quelques remarques en ce qui concerne les problèmes de méthodologie dans l'étude du facteur « eau ».

a) *Méthodologie*

Le schéma relatif à l'échelle du couvert végétal (fig. 14) montre que la mesure de l'évapotranspiration potentielle à l'échelle de la journée doit pouvoir se faire valablement avec un couvert végétal qui présente une régulation stomatique et cuticulaire importante, à condition que l'indice foliaire soit suffisant. Il en résulte toutefois que l'indice foliaire de la végétation couvrant les évapotranspiromètres devra être plus important en zone aride qu'en zone humide.

Dans les essais d'irrigations, on est souvent conduit à traiter de petites surfaces pour satisfaire aux exigences des répétitions sans avoir un dispositif trop lourd à

manipuler. Or, ces parcelles sont généralement enclavées dans des parcelles plus sèches. Il en résulte des effets d'oasis non négligeables qui augmentent, sur ces petites parcelles, l'évapotranspiration potentielle locale ; l'évapotranspiration réelle aurait donc tendance à augmenter. Même si le rapport ETR/ETP n'est pas affecté, la production de matière sèche sera plus faible que sur des parcelles plus grandes. Il en ressort que les études d'irrigation portant sur de petites parcelles sous-estiment l'efficience de l'eau. Cette erreur systématique sera d'autant plus grande que la parcelle sera petite et la zone d'étude plus sèche.

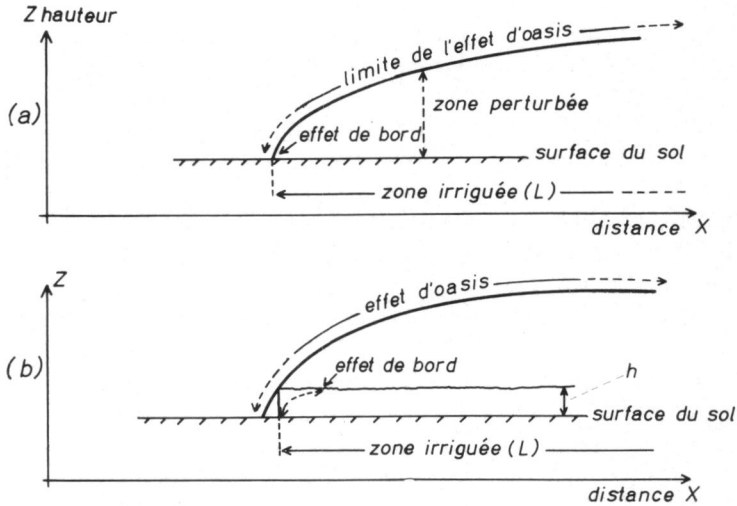


FIG. 18. — *Schéma montrant l'influence de la hauteur d'une culture sur les effets de bord et d'oasis*
a) Culture très basse. L'effet de bord ne se fait sentir que sur de très courtes distances.
b) Culture à développement vertical *h* important. L'effet de bord est plus marqué, il se fait sentir sur une distance plus importante. L'effet d'oasis de l'ensemble n'est presque pas affecté si L est grand par rapport à *h*.

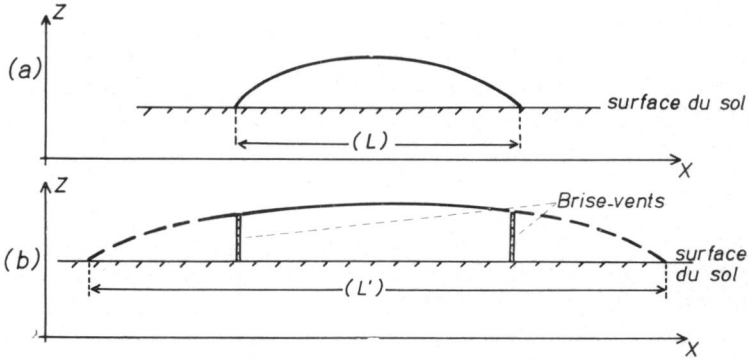


FIG. 19. — *Schéma montrant l'influence des brise-vent sur l'effet d'oasis en zone sèche*
a) Effet d'oasis dû à l'hétérogénéité L sans brise-vent.
b) La présence du brise-vent augmente la hauteur de la zone perturbée. Celle-ci correspond à une zone hétérogène de dimension L'. Tout se passe comme si le brise-vent augmentait les dimensions du périmètre irrigué. ETP est alors plus faible.

On a également remarqué au sujet des effets d'oasis dans les zones hérérogènes de différentes échelles (chapitre I) ou de la couche limite (chapitre II) que les apports advectifs avaient lieu par toute la limite extérieure de la zone perturbée et non pas seulement au voisinage du bord d'attaque. Lorsque la zone hétérogène possède un bord d'attaque ayant un certain développement vertical, l'effet d'oasis comprend un certain effet de bord. On voit toutefois, sur la figure 18, que lorsque la dimension L de l'hétérogénéité est importante par rapport à *h*, l'effet d'oasis global ne fait presque pas intervenir le paramètre h. Ainsi, pour une culture haute irriguée (maïs, arbres) située dans une zone plus aride, la consommation d'eau ne sera presque pas affectée si L est grand par rapport à *h*. Elle sera au contraire très affectée si L est faible. Ce sera par exemple le cas des rideaux d'arbres qui subissent une ETP_{locale} très élevée. Malgré des phénomènes très importants de régulation ETR locale pourra être supérieure à ETP climatique. Ce cas se rencontre par exemple à une autre échelle dans les cultures en pots. Le rapport h/L constitue un paramètre important dans l'étude des effets de bord et d'oasis en zone aride.

La présence de brise-vent dans ces dernières régions contribue à réduire la consommation d'eau car ils augmentent fictivement la dimension L (fig. 19). Tout se passe comme si la dimension de l'hétérogénéité était L'. Si les effets d'oasis et de bord revêtent une grande importance sur l'économie de l'eau en zone aride, ils ne doivent pas pour autant être négligés dans les régions subhumides de polyculture. En effet, les cultures présentant des ETR très variées sont fortement imbriquées ; il en résulte des effets de bord et d'oasis d'échelle plus ou moins importante selon les dimensions des taches d'hétérogénéité. On verra plus loin l'action de ces effets sur la production de matière sèche. On notera cependant que l'effet de bord sans interférence d'autres facteurs (lumière par exemple) est souvent visible sur une culture haute. L'effet d'oasis qui s'étend graduellement sur toute l'hétérogénéité est au contraire généralement peu visible.

L'évapotranspiration potentielle n'apparaît donc plus seulement comme une donnée climatique plus ou moins bien définie qui servirait à évaluer les besoins en eau maximum d'un couvert végétal idéal jamais rencontré dans les conditions naturelles, elle servira également de référence et permettra de juger l'efficience de l'eau. Ainsi, la cartographie de ETP ou l'étude de ses variations dans le temps ne sont pas seulement indispensables pour évaluer les apports d'eau maximum nécessaires, mais également pour implanter une végétation adaptée, pour guider les techniques qui permettront de valoriser au mieux l'eau consommée.

Il serait donc utile de mieux connaître les variations locales de ETP en fonction de la topographie, des réserves en eau du sol (pluies, profils pédologiques), du couvert végétal saisonnier et des fluctuations générales du climat.

b) *Modifications climatiques*

On n'examinera pas le problème de l'amélioration de la production agricole dans le cas où ETR est très inférieure à ETP. Par contre, on tentera d'indiquer les grandes lignes d'une amélioration possible dans le cas où ETR est voisine ou égale à ETP, soit parce que les réserves d'eau utilisables du sol à la suite des pluies sont suffisantes, soit parce qu'elles sont reconstituées grâce aux irrigations. On ne considérera donc pas le problème de la survie d'une végétation, mais celui de la recherche

d'une production maximale. Les aspects techniques et économiques des différents procédés ne seront évidemment pas envisagés bien que ce soit eux, qui en dernière analyse, décideront de l'intérêt des méthodes proposées.

On a montré dans le premier chapitre qu'à l'échelle d'une région uniforme, on avait une relation très simple entre ETR et ETP pour un climat donné :

$$\mathrm{ETR} + \mathrm{ETP} = 2\ \mathrm{ETP}_0 \qquad \text{(IV, 3)}$$

La constante 2 ETP_0 dépendant pour l'essentiel du rayonnement global absorbé $[(1-a)Rg]$ et des échanges d'énergie de grande échelle $[Q_{3-4-5}]$ de la région considérée avec les zones voisines.

Par ailleurs, le schéma présenté sur l'offre et la demande en eau au niveau de la plante conduit à rechercher l'égalité entre ETR et ETP par un abaissement systématique de ETP à chaque échelle.

Ainsi, l'augmentation de ETR entraîne, d'après (IV, 3), un abaissement de ETP et par là même améliore l'efficience de l'eau.

L'augmentation de ETR au voisinage de ETP peut être obtenu par une meilleure utilisation des réserves naturelles en eau du sol. Ainsi, les cultures associées (cf. BALDY, 1963) permettent de bénéficier de systèmes radiculaires différents pour explorer et mobiliser les réserves en eau (terme de l'équation (IV, 4), HALLAIRE). En outre, elles tendent à augmenter l'indice foliaire et à abaisser les ETP ponctuelles tout en permettant de jouer sur les exigences différentes en lumière, ce qui n'est pas possible dans le cas des cultures homogènes. Dans les zones arides à très forte luminosité, l'oasis à étages de végétation représente un cas particulièrement intéressant de mise en compétition du feuillage pour diminuer $\mathrm{ETP}_{\text{ponctuelle}}$ à chaque niveau dans le cadre d'une même $\mathrm{ETP}_{\text{locale}}$ ou $\mathrm{ETP}_{\text{climatique}}$. Les cultures inférieures par leur transpiration contribuent à diminuer le pouvoir évaporant de l'air au niveau des palmiers et améliorent la productivité de ces derniers (cf. BALDY, 1963).

La diminution de ETP peut être recherchée, en dehors de l'augmentation de ETR par la réduction des effets d'oasis de différentes échelles. On a vu que même dans les régions subhumides présentant, pour des raisons diverses, des ETR hétérogènes (réserves en eau du sol différentes ex : sable, argile, limon ou couvert végétal différent), il existait des effets d'oasis des zones à faible ETR vers les zones à fortes ETR. Il existe donc deux méthodes non exclusives l'une de l'autre : supprimer les sourches chaudes en augmentant leur évapotranspiration réelle, diminuer les effets d'oasis en freinant les mouvements latéraux de l'air. On aura ainsi intérêt à supprimer les sols nus et à utiliser au maximum les cultures dérobées pour maintenir de manière permanente un couvert végétal. Évidemment, cette technique suppose que les réserves en eau du sol soient maintenues à un niveau suffisant par irrigation. Enfin, les brise-vent divers ou l'association de cultures hautes et basses en densité variable selon les possibilités offertes par la lumière devraient freiner les effets d'oasis.

Dans ces conditions, il n'est pas déraisonnable de penser que de vastes zones « steppiques » comme la Beauce ne permettent pas aux cultures estivales (pommes de terre, betteraves ou maïs) de donner toute leur possibilité pour des raisons climatiques. Cette région céréalière se présente en effet à partir du mois de juillet comme une vaste zone sèche très ouverte aux vents. La généralisation de l'irrigation devrait non seulement porter sur les cultures à cycle long mais permettre le développement

cultures dérobées derrière céréales. Enfin, le développement de brise-vent à diverses échelles mériterait d'être étudié.

A l'opposé du problème des zones steppiques, se trouvent les pays de bocage. Les prairies présentent généralement un système radiculaire peu développé ; malgré l'humidité du sol, elles n'ont pas la possibilité de subir des ETP_{max} quotidiennes trop élevées. Les haies d'arbustes, en mobilisant l'eau des couches profondes du sol et en jouant le rôle de brise-vent, tendent à abaisser l'ETP_{max}. La part relative de ces phénomènes peut être très variable. La suppression systématique des haies ou rideaux d'arbres contribuerait à relever ETP_{max} et par suite modifierait le climat au niveau de la prairie dans un sens défavorable.

Il semble donc possible de conserver ou d'améliorer le climat au niveau des végétaux par un ensemble de techniques qui permettraient de mieux mobiliser l'eau du sol et de mieux la répartir dans le temps.

c) *Efficience de l'eau consommée*

Cependant, quand on dispose pour l'irrigation d'un certain volume d'eau, on peut se demander quelle est la meilleure manière de l'utiliser. Pour tenter de répondre à cette question, nous allons reprendre les relations citées dans les chapitres précédents.

On a vu, d'une part que : $ETR + ETP = 2\,ETP_0$ (IV, 3) et d'autre part que :

$$m = -a + b\,\frac{ETR}{ETP} \qquad \text{(IV, 2)}$$

$$= -a + b\,\frac{ETR}{2ETP_0 - ETR} \qquad \text{(IV, 4)}$$

d'où en dérivant par rapport à ETR :

$$\boxed{\frac{dm}{dETR} = \frac{2b \cdot ETP_0}{(ETP)^2}.} \qquad \text{(IV, 5)}$$

L'efficience de l'eau consommée sera d'autant plus grande que ETP sera faible ; elle varie comme l'inverse de $(ETP)^{-2}$. Ce résultat était déjà suggéré par la figure 17 qui montre qu'une variation Δq du débit maximum est d'autant plus efficace que ETP maximale est réduite. Comme ETP, pour une même radiation globale absorbée $(1 - a)\,Rg$, est susceptible de varier selon les valeurs de ε dans les cas extrêmes ($\varepsilon = 0$, $\varepsilon = 1$) dans un rapport de 1 à 2 [ETP_0 à $2\,ETP_0$, premier chapitre], l'efficience de l'eau pourrait elle-même varier d'après (IV, 5), dans un rapport théorique de 1 à 4. Il est toutefois bien évident que l'intervention d'autres facteurs viendra limiter ces possibilités de variations. On retiendra cependant que l'eau sera d'autant mieux valorisée que ETP sera voisine pour une radiation globale donnée, de sa valeur minimale ETP_0. On rapprochera également le calcul précédent de la très large variation de l'efficience de l'eau observée précédemment en fonction de la latitude (rapport de un à cinq).

Quand on dispose en vue de l'irrigation d'une certaine quantité d'eau, dans un barrage par exemple, on a donc intérêt à l'apporter sur une surface plus réduite pour laquelle ε sera plus important. De même, on aura intérêt à pratiquer l'irrigation

sur de vastes périmètres homogènes plutôt que sur de petits périmètres dispersés à ETP plus élevées. Pour la même raison, la productivité de grandes oasis est relativement plus élevée que celle de petites oasis.

On constate également que de vastes champs de cultures homogènes ou associées contribueront à créer un climat en équilibre avec eux-mêmes, alors que de petites surfaces seront en déséquilibre par rapport au milieu extérieur. Ainsi, dans le cas d'inclusion dans des zones plus sèches et toutes autres conditions restant égales, s'explique la production plus forte de vastes zones homogènes par rapport aux zones hétérogènes, dont les associations végétales, n'ont pas été étudiées.

CONCLUSION

L'étude de la transpiration au niveau de la feuille, de la plante, puis du couvert végétal continu, a conduit dans tous les cas à une représentation schématique semblable. D'une part, le climat impose une certaine « demande » en eau, d'autre part, la plante compte tenu des réserves en eau du sol, est susceptible de présenter une « offre » maximale. L'équilibre ou le déséquilibre entre ces deux facteurs, en entraînant la régulation stomatique et cuticulaire, contribuerait à isoler plus ou moins la plante du milieu extérieur ; la réduction des échanges gazeux (CO_2 notamment) limiterait alors l'activité photosynthétique.

Il est donc apparu que ETP_{max} au cours de la journée pouvait être un facteur limitant de la production de matière sèche par les végétaux. Nous pensons que ce déséquilibre hydrique se manifeste même sur des végétaux qui ne présentent aucun flétrissement et qui transpirent globalement une quantité d'eau égale à $ETP_{climatique}$. La réduction des échanges gazeux qui accompagne ce déséquilibre hydrique apparaît non seulement comme étant très sévère durant les heures les plus lumineuses et les plus chaudes de la journée, mais comme étant également de longue durée, même en zone subhumide. La seule prise en considération de ce phénomène contribue à limiter très fortement les possibilités de production de matière sèche des végétaux pourtant situés en apparence dans les meilleures conditions.

Le schéma proposé a alors permis d'interpréter un certain nombre de faits agronomiques concernant l'efficience de l'eau ; variation de celle-ci avec la latitude, différences de rendement dans les oasis, etc. Cependant, ce schéma suggère des voies d'amélioration.

On peut en effet tenter de réduire le déséquilibre hydrique en agissant soit sur les paramètres qui commandent le débit maximum (q_{max}), soit sur ceux qui déterminent ETP_{max}. On a d'ailleurs noté que les variables q_{max} et ETP_{max} ne sont pas totalement indépendantes puisque la vitesse de desséchement du sol contribue à rendre ce dernier apparemment plus sec.

La mobilisation des réserves en eau du sol par des variétés végétales adaptées ou des associations culturales, la pratique de l'irrigation quand les pluies font défaut, permettent d'agir sur q_{max} donc sur ETR. Cependant, dans tous les cas, on a intérêt à réduire ETP. De multiples solutions ont été indiquées ; elles vont des techniques de jardinage qui utilisent les semis denses avec repiquage ou les arrosages fréquents, aux aménagements du territoire au moyen de brise-vent en passant par les techniques culturales déjà connues mais qui mériteraient d'être étudiées en

fonction du problème posé (cultures intercalaires pour couvrir le sol, associations culturales, densité de peuplement).

L'abaissement de ETP se traduit non seulement par une diminution de la consommation d'eau mais par une augmentation de son efficacité. On a pu fixer de 1 à 4 les limites théoriques de cette variation. Malgré le caractère très hypothétique et approché de nos calculs, il en ressort nettement de grandes possibilités d'amélioration de productivité. On ne connaîtrait donc pas actuellement les potentialités de production de nos meilleures variétés cultivées.

Finalement, l'évapotranspiration potentielle maximale au cours de la journée semble être un facteur limitant dont on pourrait réduire les effets par un ensemble de techniques. Celles-ci devraient tendre à rompre le complexe naturel qui existe entre deux facteurs de même origine solaire : la qualité et l'intensité de certaines radiations indispensables à la photosynthèse et l'ensemble des autres radiations qui interviennent ou commandent l'évapotranspiration potentielle.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et la production de matière sèche n'ont pas été envisagées sur de longues périodes dans le but de faire des bilans, mais sur des périodes égales ou inférieures à 24 heures pour mieux analyser les différents facteurs climatiques ou biologiques agissant, pour étudier leur interaction et tenter de dégager des voies d'amélioration de la production agricole.

L'évapotranspiration potentielle a été définie comme l'évapotranspiration maximale d'un végétal quand l'énergie est le seul facteur limitant. L'évapotranspiration réelle, inférieure ou égale à ETP, correspond alors à l'intervention d'autres facteurs limitants.

En partant de cette définition unique, on a été conduit à étudier le sens à donner à celle-ci en fonction de l'échelle où l'on considère le phénomène ; échelle régionale, échelle du champ, de la plante, de la feuille. A chaque échelle, il a été possible d'évaluer ETP, ETR et d'établir des relations simples entre ces termes, les facteurs du milieu et la production de matière sèche.

Dans un premier chapitre, en se plaçant à une échelle supérieure à celle de la turbulence, c'est-à-dire à une échelle supérieure à quelques dizaines d'hectares, en utilisant la méthode du bilan d'énergie sur 24 h, on a montré que ETP pouvait être reliée soit au rayonnement global absorbé, soit au rayonnement de grande longueur d'onde, ETR étant mise en relation avec le rayonnement net. Ces relations sont établies en négligeant les transferts latéraux d'énergie ou effet d'oasis de grande échelle ; elles montrent toutefois que ETP et ETR ont, à cette échelle, une signification météorologique indépendamment du type de couvert végétal.

Par ailleurs, la relation simple établie entre ETP et ETR [$ETP + ETR \leqslant (1-a)Rg$] permet de fixer les limites possibles de variation de ETP par suite d'une irrigation généralisée. Il apparaît qu'au maximum dans le cadre de cette échelle, ETP variera du simple au double.

Dans un deuxième chapitre, la méthode du bilan d'énergie est appliquée au niveau de la feuille en étudiant également les échanges gazeux. L'utilisation de la couche limite laminaire dite équivalente permet d'aboutir à des équations relativement simples où l'on peut séparer les facteurs climatiques (rayonnement net, température, vent, déficit de saturation, pression de CO_2), les facteurs morphologiques (forme, dimension, rugosité) de la plante, les facteurs physiologiques et édaphiques (régulation stomatique et cuticulaire (ε_φ)). Ces équations donnent successivement en fonction de l'ensemble de ces facteurs, la température de surface, la régulation stomatique et cuticulaire (ε_φ) et enfin une évaluation de la production de matière sèche.

Ces équations montrent combien le milieu considéré à cette échelle est fluctuant par rapport à celui envisagé dans le premier chapitre. La biochimie de la feuille s'inscrit dans un climat qui peut être très différent de celui défini à partir des données recueillies sous abri météorologique. La transpiration apparaît comme généralement très inférieure à l'évapotranspiration potentielle par suite de l'intervention de la régulation stomatique et cuticulaire. A cette échelle, la plante joue un rôle essentiel dans l'interaction des phénomènes. La production de matière sèche semble alors limitée par le jeu de la régulation stomatique et cuticulaire. Il en résulte que l'évapotranspiration potentielle instantanée et ponctuelle que l'on définit dans ce chapitre est un facteur limitant de la production de matière sèche au niveau de la feuille. Ce facteur climatique pouvant jouer de manière variable à chaque niveau du feuillage serait ainsi responsable de certaines variations de la production agricole, non seulement en quantité mais également au point de vue de sa qualité (notion de crus par exemple).

Étant donné l'importance qu'il faut accorder aux variations de ETP sur l'efficience de l'eau consommée, il a semblé utile de proposer *dans un troisième chapitre* une formule dérivée de la formule de PENMAN donnant l'évapotranspiration potentielle à une échelle de 24 heures à partir de simples mesures d'évaporation sous abri. Celles-ci doivent être corrigées en fonction de la température de l'air, du point de rosée et d'un indice $\varepsilon = \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}}$. Cette formule relie ETP à l'évaporation d'une surface liquide dont la température serait celle de l'air ; elle permet donc d'approcher les variations de ETP à une échelle de temps inférieure à 24 heures et a été longuement utilisée dans le quatrième chapitre. Malgré des hypothèses de départ strictes, la formule doit permettre, dans les conditions naturelles, de cartographier ETP à une échelle inférieure à l'échelle régionale pour laquelle sont valables la plupart des formules. On serait donc en mesure de mieux suivre les variations de ETP en fonction par exemple du relief, du type de sol ou des facteurs climatiques très variables localement tels que le vent.

Dans le quatrième chapitre, on a proposé une synthèse agronomique des trois premiers chapitres sous forme d'un schéma où la circulation de l'eau était présentée comme un équilibre ou un déséquilibre entre la demande imposée par le climat (ETP) et l'offre (q_{max}) proposée par la plante en fonction notamment des conditions édaphiques (cf. HALLAIRE, 1963). Il est apparu que même lorsqu'au niveau du couvert végétal, on avait ETP = ETR, il pouvait exister un déséquilibre hydrique invisible au niveau de la feuille. Ce déséquilibre serait sévère et prolongé même lorsque l'eau est en abondance dans le sol. Ce déséquilibre, traduit par une régulation stoma-

tique et cuticulaire, autre que « photique » limite indirectement les échanges gazeux et réduit ainsi la production de matière sèche.

Le premier problème agronomique est donc d'amener globalement au niveau du couvert végétal ETR à être égal à ETP. C'est généralement sous cet aspect que l'on considère l'eau comme facteur limitant de la production agricole. La définition des besoins en eau par la méthode des bilans hydriques faits sur de longues périodes répond à cette préoccupation. On a vu que si cette condition globale, ETR = ETP, est réalisée, on devait cependant tendre à avoir ETR = ETP à toutes les échelles, notamment au niveau de la feuille.

La solution de ce problème ne peut être recherchée que par un abaissement systématique de ETP climatique afin d'abaisser également les ETP d'échelles inférieures. On a alors proposé ou rappelé diverses solutions qui ne sont pas exclusives les unes des autres, mais très souvent complémentaires : elles consistent soit à augmenter l'offre (ETR) pour abaisser ETP, soit à abaisser directement ETP.

1) Augmentation de ETR. Celle-ci peut être obtenue grâce aux systèmes radiculaires différents des cultures associées (cf. BALDY, 1963) en utilisant mieux les réserves en eau du sol. L'amélioration des techniques du travail du sol et l'irrigation généralisée aboutissent au même résultat. L'efficicence de l'eau consommée augmentera avec la dimension des périmètres irrigués.

2) Diminution directe de ETP.

a) Les brise-vent naturels ou artificiels (cf. GUYOT, 1963) permettent de réduire les effets d'oasis. Ces brise-vent peuvent présenter tous les intermédiaires possibles avec les cultures associées.

b) La couverture permanente du sol par une végétation pour éviter la création de sources d'air chaud au-dessus du sol entre deux cultures. L'irrigation doit d'ailleurs permettre la généralisation des cultures dérobées derrière les cultures principales qui ont pu utiliser les réserves en eau du sol avec ou sans irrigation.

c) Augmentation de l'indice foliaire quand l'eau n'est pas facteur limitant en augmentant la densité de peuplement ou en jouant sur les étages de végétation comme dans les oasis ou les prévergers.

Il ressort donc de cette étude que les vastes zones steppiques du type de la « Beauce » ne semblent pas présenter à priori les meilleures caractéristiques climatiques pour obtenir une production élevée et une bonne efficience de l'eau. Au contraire, des paysages présentant un bocage plus ou moins dense se rapprocherait des conditions optimales. La valorisation de l'eau apportée suppose donc non seulement un aménagement des techniques mais également un aménagement du territoire.

L'étude de ETR, ETP et de la production agricole a fait ressortir que ETP ne devait pas servir seulement à définir les besoins en eau maximaux. Il apparaissait dans ces variations locales et quotidiennes comme un facteur limitant de la production par suite de la valeur instantanée souvent trop élevée dans la journée. Ainsi, même dans les régions où le problème ne semblait pas se poser, même en l'absence de flétrissement temporaire, les végétaux cultivés dans les meilleures conditions apparentes d'alimentation en eau souffrent d'un déséquilibre très prolongé. L'élaboration de matière sèche n'aurait lieu que durant un temps réduit par rapport à la période active de végétation. On ne connaîtrait donc pas actuellement le rendement potentiel de nos meilleures espèces cultivées par suite de l'intervention de ce facteur limitant d'origine climatique.

Nous avons examiné succinctement les moyens d'action. L'irrigation de base ou de complément n'est apparue que comme une technique parmi d'autres. La manière dont l'eau est évapotranspirée au cours du temps importe autant que la quantité d'eau consommée.

Les techniques proposées ou rappelées vont des techniques de jardinage aux remodelage du paysage en passant par les techniques culturales. Toutes ces méthodes devraient tendre à rompre le complexe climatique naturel qui lie l'intensité lumineuse aux pouvoirs évaporants élevés. L'intervention sur le climat à toutes les échelles en tentant de réduire ETP sans perdre sur le facteur lumière devrait permettre de dégager de nouvelles potentialités de production agricole tout en augmentant l'efficience de l'eau consommée.

Reçu pour publication en juin 1963.

SUMMARY

ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION, POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION AND AGRICULTURAL PRODUCTION

Potential evapotranspiration (ETP) and actual evapotranspiration (ETR) are defined at the level of the leaf, plant and continuous vegetal cover. At each level, the relationships between ETP, ETR and agricultural production are established.

In the first chapter, using a 24-hour balance of energy on a regional level and applying certain hypotheses on the homogeneity of the zone studied, ETR + ETP are given as constant ; since this constant is near to the global radiation absorbed, it is possible to evaluate the results of different authors on the significance and estimation of ETP. Attention is drawn to the « Oasis effect » at different levels and the limits of possible modifications of ETP by large-scale irrigation are established.

In the second chapter, the method of energy balance is applied on leaf level, and gaseous exchanges (CO_2, O_2) across the different terminal laminary layers are studied. Equations are proposed for the estimation of the temperature (II. 27 or II. 28), actual transpiration (II. 33 or II. 35), and dry-matter production (II. 55) of the organ. These equations are discussed from the point of view of the role played by the characteristics of the leaf (form, size, light reflexion), stomatal and cuticular regulation, and various environmental factors (saturation deficit, wind, net radiation, CO_2, etc.). The equations show the existence at this level of a correlation between ETR, ETP and dry-matter production, suggesting that an increased efficiency of water utilization requires a reduction in ETP.

In the third chapter, a formula for the evaluation of ETP from data on evaporation under cover is proposed, corrected in relation to air temperature, dew point and the index $\frac{ETR}{ETP}$ (III. 13 or III. 14). This formula may also be derived from PENMAN's formula. The formula indirectly relates ETP to saturation deficit and wind velocity, and permits the mapping of ETP on an agricultural level (which is often near to that of turbulence). It appears that ETP may show marked fluctuations around the regional value, depending on numerous factors (topography, windbreaks, different reserves of soil moisture, ETR values varying from one vegetal cover to another, etc.). The knowledge of the fluctuations in ETP is indispensable where an improvement of the efficiency of water utilization is attempted.

In the fourth chapter, a 24-hour schema is proposed, which permits linking the « demand » of the water imposed by the climate (ETP) with the « offer » of water depending on the plant (ETR). Thus the indirect action of an equilibrium or disequilibrium between offer and demand on photosynthetic activity could be assessed. The effect of multiple parameters (soil, climate, plant) and their interactions can also bee analysed by using this schema. The schema is used for interpreting certain agronomical facts, such as the variation in water efficiency according to latitude and benefits of nurseries for young plants. It appears that the daily ETP max is a limiting factor in production, even if the « offer » of water is on the whole sufficient at the level of the vegetal cover. Consequently,

the rate of production of the best crops is probably not known, due to the daily disequilibrium invisible in the water nutrition at leaf level. The agronomical problem is a systematic reduction of ETP. The various solutions proposed (windbreaks, continuous vegetal cover, irrigation, associated crops, etc.) relate to the management of the area in the widest sense, and limits to the possibility of modifying the climate in plant stands are envisaged.

Finally, plants suffer from a daily disequilibrium of water even in sub-humid zones. The way of water consumption is as important as the amount of water consumed in the synthesis of dry matter. The systematic reduction of ETP should be investigated. New agricultural techniques which often lead to a regional modification of the landscape may have great potentialities in agriculture, resulting both in a reduction of water consumption and in a great increase in water efficiency.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKLICHE EVAPOTRANSPIRATION, POTENTIELLE EVAPOTRANSPIRATION UND LANDWIRTSCHAFTLICHE PRODUKTION

Die potentielle (PET) und die wirkliche Evapotranspiration (WET) werden auf der Stufe Blatt, Pflanze und geschlossene Pflanzendecke bestimmt, mit Aufstellung von Relationen auf jeder Stufe mit der landwirtschaftlichen Produktion.

In einem ersten Abschnitt, so man sich auf regionale Ebene stellt, und die Methode der Energiebilanz auf 24 Stunden benützt, mit einigen Annahmen über Homogeneität der untersuchten Zone, ist es möglich, WET + PET = konstante Grösse zu schreiben ; da diese Grösse nahe der absorbierten Globalstrhalung liegt, kann man die Ergebnisse verschiedener Autoren über Bedeutung und Schätzung der PET wiederfinden. Unsere Arbeit lenkt die Aufmerksamkeit auf die Oaseneffekte verschiedener Stufen und ermöglicht die Festseztung der möglichen Grenzen der PET als Folge ausgedehnter Bewässerung.

Im zweiten Abschnitt wird die Methode der Energiebilanz sofort auf dem Blatte angewendet mit gleichzeitigem Studium des Gasaustausches (CO_2, O_2) durch die laminären Grenzschichten. Von den Gleichungen ausgehend, ist es möglich, die Temperatur des Organs (II, 27 oder II, 28), seine wirkliche Transpiration (II, 33 oder II, 35) die Höhe der Trockenmasseerzeugung (II, 55) einzuschätzen. Durch Diskussion der Formeln kann man die Rolle der Blattcharakteristiken (Form, Ausmass, Albedo), diejenige der Spaltöffnungen und der Kutikula und der verschiedenen Umweltfaktoren (Sättigungsdefizit, Wind, Strahlung, CO_2 usw) erkennen. Die dargestellten Gleichungen zeigen die Beziehungen, die auf dieser Stufe zwischen WET, PET und Produktion von Trockenmasse herrschen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die PET herabzusetzen um die Wirksamkeit des verbrauchten Wassers zu erhöhen.

Im dritten Kapitel wird eine Formel zur Schätzung der PET vorgeschlagen, von den Daten der Evaporation an geschützter Stelle ausgehend, verbessert in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, des Taupunktes und des Indexes $\frac{WET}{PET}$ (III, 13 oder III, 14). Diese Formel kann übrigens von der PENMANschen Formel ausgehend, aufgestellt werden. Sie verbindet indirekt PET mit Sättigungsdefizit und Windstärke. Dank ihrer sollte es möglich sein, die PET auf landwirtschaftlicher Ebene zu kartographieren (sehr nahe der Turbulenzstufe). Wie es scheint, mag die PET ganz gewaltig um den Regionalwert herumfluktuieren, in Verbindung mit zahlreichen Faktoren (topographische Hindernisse oder Windschutz, Boden mit unterschiedlicher Wasserreserve, WET je nach Pflanzendecke usf...). Die Kenntnis dieser Fluktuationen der PET ist unumgänglich, um die Wasserwirkung zu verbessern.

Im vierten Kapitel wird, wenn man den vorhergehenden Analysen Rechnung trägt, ein Schema vorgeschlagen für 24 Stunden, durch welches man die « Wassernachfrage » durch das Klima (PET) an das « Wasserangebot » (WET) binden kann. Man ist alsdann in der Lage, die indirekte Wirkung des Gleichgewichts zwischen Nachfrage und Angebot auf die Photosynthese zu beurteilen. Das Schema gestattet, durch Gruppierung der verschiedenen Parameter (Boden, Klima, Pflanze) besonders ihre Wechselwirkungen zu analysieren. Eine ganze Anzahl agronomischer Tatsachen können durch das Schema ausgelegt werden. (z. B. Änderung der Wasserwirkung je nach Breitegrad, Wert der Oasen mit Vegetationsstufen, Wert der Braumschulkultur für junge Pflanzen usw...). Die tägliche PET gilt als ein begrenzender Faktor im Ertrag, selbst wenn das « Angebot » an Wasser für die Pflanzendecke global gesehen genügend ist. Daraus ergibt sich, dass man wahrscheinlich nicht

das Ausmass der Produktion der besten Kulturen kennt, infolge der täglichen, unsichtbaren Gleichgewichtsstörungen in der Wasserraufnahme des Blattes. Systematische Herabsetzung der PET ist also das agronomische Problem. Die verschiedenen vorgeschlagenen, oder in Erinnerung gebrachten Lösungen (Windschutz, zeitlich laufende Pflanzendecke, Bewässerungen, Mischkulturen, Oasen mit Vegetationsstufen usw) betreffen die Bewirtschaftung des Landes im weitgehendsten Sinne; es werden ebenfalls die Grenzen der Möglichkeiten der Klimaänderung für die Pflanzen ins Auge gefasst.

Endlich, selbst in den subfeuchten Zonen, leiden die Pflanzen unter täglicher Störung des hydrischen Gleichgewichts. Die Art und Weise des Wasserverbrauchs ist ebenso wichtig wie die Menge für die Erzeugung der Trockenmasse. Man muss versuchen, die PET systematisch herabzusetzen. Durch Benützung neuer agronomischer Techniken die oft das regionale Antlitz der Landschaft verändern, sollte es möglich sein, neue Potentialitäten der landwirtschaftlichen Produktion freizumachen. Es sollte nicht nur eine Verringerung des Wasserverbrauchs, sondern eine starke Erhöhung seiner Effizienz erstrebt werden.

РЕЗЮМЕ

Реальная эвапотранспирация, потенциальная эвапотранспирация и сельскохозяйственная продукция.

Р. Ж. БУШЭ.

Потенциальную эвапотранспирацию (ETP) и реальную эвапотранспирацию (ETR) можно определить в масштабах листа, растения и непрерывного растительного покрова. В каждом из этих масштабов существует соотношение между ETP, ETR и сельскохозяйственной продукцией.

В первой главе данной статьи автор доказывает, при помощи баланса энергии за 24 часа, что ETP + ETR, в условиях масштаба края и при гипотезе однородности изучаемого района — дают некую постоянную величину; а в виду того, что постоянная эта тождественна с количеством общего впитанного излучения — изучение приводит к уже достигнутым многими авторами результатам по поводу значения и оценки ETP. Напомнив об эффектах оазиса в различных масштабах автор старается установить границы возможных изменений ETP вызванных обширными ирригациями.

Вторая глава посвящена одновременному изучению газообмена (CO_2, O_2) через ограничивающие лист пластинчатые слои и использования при этом, мгновенным способом, баланса энергии в масштабе листа. И становиться таким образом возможным, определить при помощи предлагаемых уравнений температуру органа (II 27 или II 28), его реальную транспирацию (II 33 или II 35), и уровень продукции сухой массы (II 55). Обсуждение формул помогает судить о роли характерных признаков листа (форма, размеры, альбедо), регуляции его устьиц, кутикулярной регуляции и о роли различных факторов среды (дефицит насыщенности, ветер, излучение, CO_2 и др.). Предлагаемые формулы определяют связи существующие в этом масштабе между ETP, ETR и продукцией сухой массы. Отсюда вытекает необходимость уменьшения ETP чтобы увеличить эффективность потребленной влаги.

В третьей главе автором предлагается формула для определения ETP исходя от данных испарения под прикрытием, с поправкой по отношению температуры воздуха, точки росы и указателя $\frac{ETR}{ETP}$ (III 13 или III 14). Определение этой формулы возможно также исходя из формулы Пенмана. Она косвенно связывает ETP с дефицитом насыщенности и со скоростью ветра. Благодаря ей возможно картографическое изображение ETP в сельскохозяйственном масштабе (масштаб приближающийся

довольно часто к масштабу турбулентности). И действительно, оказывается, что ETP способна подвергаться крупным изменениям по отношению к своей краевой величине, в зависимости от многочисленных причин (топографические неровности, различные водные запасы почв, разные величины ETR различных растительных покровов и т. д.). Необходимо значит принимать во внимание эти изменения для увеличения эффективности влаги.

В четвертой главе, автор, основываясь на пред'идущих анализах, предлагает 24-х часовую схему, благодаря которой возможно связать « спрос » на влагу под влиянием климата с « предложением » влаги которую предоставляет растение. Таким образом, является возможность судить о косвенном действии равновесия или отсуствия такового между « спросом » и « предложением » влаги, на активность фотосиптеза. Схема эта предоставляет возможность проанализировать при помощи их перегруппировки, действие многочисленных параметров (почва, климат, растение) и в частноти, изучение их взаимодействия. Исходя из этой схемы автор разсматривает некоторые сельскохозяйственные факты (напр. : изменения эффективности влаги в зависимости от широты, интерес питомников для саженцев и т. д.).

И становится очевидным что ежедневная ETP является фактором ограничивающим продукцию, даже тогда, когда « предложение » влаги вобщем достаточно в масштабе растительного покрова. Из этого следует — что нам, по всей вероятности, неизвестен возможный уровень продукции лучших из сельскохозяйственных растестений, в виду постоянного, но незамечаемого нами, отсутствия равновесия в водном питании взятом в масштабе листа. Систематическое понижение ETP представляет следовательно сельскохозяйственную задачу. Возможные ее разрешения предлагаемые или напоминаемые автором (ветроломные полосы, постоянный во времени растительный покров, ирригации, растительные сообщества, оазисы с послойной растительностью и т. д.) относятся к устроению, в самом широком значении этого понятия, данной территории.; автор пытается также установить границы возможных изменений климата на уровне растений.

В конце концов, даже в субвлажных зонах, растения страдают от ежедневного неравновесного состояния влаги. Способ потребления влаги также важен как и ее количество необходимое для выработки сухой массы. Нужно добиватся систематического понижения ETP. Введение в сельское хозяйство новых технических приемов, при помощи которых часто достигаются изменения пейзажей края, должно было-бы позволить выделение новых потенциальностей сельскохозяйственной продукции.

И необходимо было-бы добиться, не только понижения количества потребляемой влаги, но также и усиления ее эффективности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALDY Ch., 1963. Cultures associées et productivité de l'eau. *Ann. agron.*, **14** (4).

BANGE G. G. J., 1953. On the quantitative explanation of stomatal transpiration. *Act. Bot. Neerland*, **2**, 3, 255-297.

BERNARD E. A., 1956. Le déterminisme de l'évaporation dans la nature. Étude des aspects géophysique et écologique du problème dans le cadre du bilan énergétique. *Publ. Inst. nat. Étude agron. Congo belge* (I. N. E. A. C.), 158 p. (80 réf. bibl.).

BOUCHET R. J., 1962. L'évapotranspiration potentielle. Sa mesure ou son estimation à partir de l'évaporation sous abri. Signification et intérêt écologique. Colloque international sur la méthodologie de l'écophysiologie végétale (à paraître dans la série « *Recherches sur la zone aride* » U. N. E. S. C. O.).

BOUCHET R. J., de PARCEVAUX S., J. ARNOUX 1963. Amélioration du rendement des végétaux par l'abaissement de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*

BOUCHET R. J., RIOU Ch., 1960. Essai d'interprétation de la variation de la constante psychrométrique. *C. Acad. Sci.*, **250**, 4419-4421.

BRUN E. A., 1955. *Introduction à l'étude de la couche limite.* Gauthier Villard, Paris, 189 p.

DAMAGNEZ J., 1961. Les besoins en eau réels des cultures et les possibilités d'utilisation des réserves en eau du sol en Tunisie. Influence de la salure. *Ann. agron.*, **12**, 19-109 (en collaboration avec O. de Villele).

DAMAGNEZ J., RIOU Ch., 1963. L'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Ann. agron.*, **14** (4).

DEACON E. L., PRIESTLEY C. H. B., SOINBANK W. C., 1958. Évaporation et bilan hydrique. Climatologie. Compte rendu de recherches. *Recherches sur la zone aride*, U. N. E. S. C. O., **9**, 39 (207, réf. bibl.).

De PARCEVAUX S., 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. *Ann. agron.*, **14** (5).

EYRAUD R., 1960. Note préliminaire sur les mesures psychrométriques. Notes de l'établissement d'études et de recherches météorologiques. Direction de la Météorologie nationale, 27 p.

GODARD, 1963. Transpiration et maturations du blé dans le Languedoc méditerranéen. *Ann. agron.*, **14** (5).

GUYOT G., 1963. Les brise-vent. *Ann. agron.*, **14** (4).

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de desséchement. *Ann. agron.*, **14** (4).

LACOSTE J., 1963. Calcul graphique de l'évapotranspiration potentielle selon les formules de R. J. BOUCHET et L. TURC. *Ann. agron.*, **14** (4).

MILTHORPE F. L., 1962. Plant factors involved in transpiration. *Recherches sur la zone aride*, **16**, 107-115. Coll. de Madrid.

PENMAN H. L., 1956. Évaporation : an introductory survey. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **4**, 9-30.

PETINOV N. S. 1961. Base physiologique pour une bonne efficacité d'une irrigation intermittante des plantations de Thé. (en russe) Tzu. AK. NAUK. SSSR. Ser. Biol., 5. 717-728.

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Évapotranspiration et rendement culturaux. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1774-1776.

ROUX E. 1962. communication personnelle.

RUHLAND W., 1956. *Handbuch der pflanzenphysiologie III.* Pflanze und Wasser. Springer-Verlag, Berlin, 1073 p.

SCHLICHTING , 1958. *Grenzschicht Theorie.* Verlag G. Braun, Karlsruhe, 603 p.

STANHILL G., 1960. The relationship between climate and the transpiration and growth of pastures. *Proc. 8th Intern. Grassland Congr.*, 12 A/6.

SUTTON O. G., 1953. *Micrometeorology. A study of physical processes in the lowest layers of the earth's.* Book company Inc, London, 334 p.

THORNTHWAITE C. W., 1948-1949. *Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere.* The Johns Hopkins Univ., Lab. Climatol. Yearbook, New Jersey.

TURC L., 1953. Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. agron.*, 1954, 491-595 ; 1055, 5-131.

TURC L., 1961. Évolution des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. *Ann. agron.*, **12**, 1.

VERNET A., CHAUSSAT R., 1961. Dynamique radiculaire et alimentation en eau des végétaux. *Ann. agron.*, **12** (1) 157-168.

VERNET A., 1963. Évaporation de l'eau du sol. *Ann. agron.*, **14** (4).

Ann. agron., 1963, **14** (5), 825-834

AMÉLIORATION DU RENDEMENT DES VÉGÉTAUX PAR ABAISSEMENT DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

R. J. BOUCHET, S. de PARCEVAUX et J. ARNOUX

Station centrale de Bioclimatologie ; Service de Biométrie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

L'élaboration de matière sèche par les végétaux dépend dans une certaine mesure de leur transpiration. De nombreux auteurs ont établi l'existence de relations entre la consommation d'eau et les rendements. Ces travaux montrent que le rendement optimal est obtenu lorsque les besoins en eau définis par l'évapotranspiration potentielle climatique (1) sont satisfaits. Le rendement diminue lorsque l'évapotranspiration réelle (ETR) est inférieure à l'évapotransporation potentielle (ETP). Le facteur « eau » intervient par l'intermédiaire du sol et il est alors admis qu'il n'est pas limitant de la production quand le sol est au voisinage de la capacité de rétention. L'irrigation, en augmentant les disponibilités en eau, améliore et régularise en effet la production.

On se propose de montrer que l'utilisation des ressources en eau du sol, avec ou sans irrigation, ne constitue qu'un aspect du problème de l'alimentation en eau des

(1) L'évapotranspiration comprend l'évaporation du sol, la transpiration cuticulaire et stomatique du végétal.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un facteur climatique qui correspond à l'énergie disponible pour la vaporisation ; elle dépend des éléments climatiques (rayonnement net, déficit de saturation, température, vent) ; elle est égale, pendant un temps donné, à la perte d'eau maximale en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant, continu, en pleine croissance, très largement alimenté en eau.

L'évapotranspiration réelle (ETR) fait intervenir d'autres facteurs limitants que l'énergie (ex : facteur eau, physiologie et morphologie du végétal, etc.), elle est inférieure ou au plus égale à ETP.

Dans l'étude des relations de la plante avec le milieu, on a été conduit (cf. article de R. J. Bouchet, « ETP, ETR et production agricole », chapitre IV, page 800 et 801) à définir plusieurs ETP ou ETR selon l'échelle du phénomène considéré.

L'échelle ponctuelle représente la transpiration ou l'évaporation en un point particulier de l'espace ; exemple : transpiration d'une feuille ou évaporation d'une pastille évaporante placée dans les mêmes conditions.

L'échelle locale représente la transpiration sur une verticale en un lieu donné, par exemple, l'évapotranspiration d'une plante prise individuellement avec ses différents niveaux de feuillage. Les ETP et ETR locales dépendent directement de l'environnement et varient par exemple d'un point à l'autre d'un champ.

L'évapotranspiration potentielle climatique correspond à la mesure indiquée précédemment avec un couvert végétal continu. L'échelle des distances est de l'ordre de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Les données météorologiques relevées sous un abri classique correspondent à cette échelle intermédiaire entre celle de la turbulence et de la convection.

plantes. Notre but est de prouver que l'évapotranspiration potentielle (aspect climatique du facteur eau) est également un facteur limitant de la production de matière sèche et qu'il est possible en la réduisant, d'améliorer les conditions de fonctionnement de la plante et de dégager, en matière de production agricole, de nouvelles potentialités.

Après avoir rappelé l'hypothèse de départ que nous avons développée dans les articles précédents (R. J. BOUCHET, S. de PARCEVAUX, 1963), nous montrerons sa vérification dans les conditions naturelles à l'échelle agricole et nous en tirerons quelques conséquences agronomiques [1].

I. — HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

On constate, même en zone subhumide, que la transpiration des feuilles des plantes de grande culture est inférieure aux possibilités physiques locales d'évaporation définies par le climat. Même sans apparition de flétrissement temporaire, il est observé une réduction de la transpiration due à la régulation stomatique et cuticulaire par rapport à l'évapotranspiration potentielle ponctuelle ou locale.

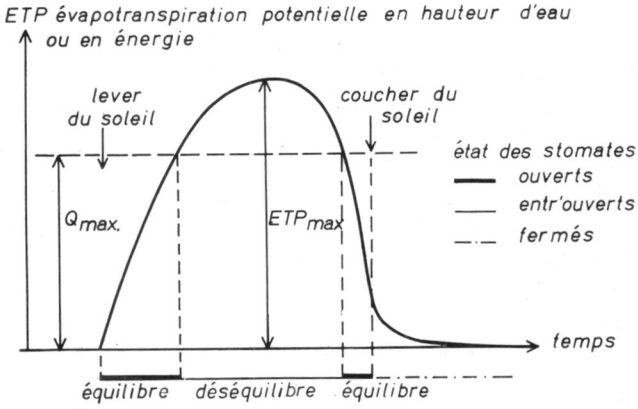


FIG. 1

Ces phénomènes étant relativement fugitifs et variables en fonction d'un grand nombre de paramètres, une représentation schématique permettra de mieux saisir les multiples aspects de ce problème.

Sur la figure 1, on a représenté l'évolution de l'évapotranspiration potentielle locale au cours de la journée. Cette courbe de ETP traduit les variations de la « demande » en eau imposée à la plante par le climat. Celle-ci passe par un maximum vers le milieu de la phase diurne.

De son côté, la plante est susceptible d'assurer un débit maximal (Q_{max}) qui correspond à l' « offre » ; ce débit est fonction de l'espèce, de l'état physiologique de

[1] Cf. C. R. Acad. Agric., **48**, 686-694, 1962. Influence de l'irrigation et d'une réduction de l'évapotranspiration potentielle au moyen d'un brise-vent sur le rendement des plantes cultivées, par R. J. BOUCHET et S. de PARCEVAUX.

la plante et directement des quantités d'eau disponibles dans le sol et de la vitesse d'utilisation de cette eau (cf. HALLAIRE, 1963).

Tant que la « demande » est inférieure à l'« offre », les stomates restent largement ouverts et l'évapotranspiration réelle correspond à l'évapotranspiration potentielle (les conditions « photiques » étant satisfaites. Voir pages 689 à 691).

Lorsque la « demande » (ETP_{max}) dépasse l' « offre » (Q_{max}), l'intervention de la régulation stomatique et cuticulaire maintient la transpiration à un niveau qui, dans les meilleures conditions, reste au plus égal au débit Q_{max}. L'évapotranspiration réelle « décroche » par rapport à l'évapotranspiration potentielle. Mais la régulation stomatique et cuticulaire affecte non seulement la diffusion de la vapeur d'eau mais également celles de l'oxygène et du gaz carbonique. Cette réduction des échang es gazeux peut contribuer à limiter l'activité photosynthétique.

On voit sur la figure 2 que la position relative de Q_{max} et ETP_{max} va définir le temps d'intervention de la régulation stomatique. On conçoit que de telles diminutions passagères de l'activité photosynthétique, s'ajoutant jour après jour, puissent contribuer à limiter d'une manière insoupçonnée les rendements et masquer, même en l'absence de sécheresse caractérisée, le potentiel de production d'une plante déterminée.

L'hypothèse de travail consiste donc à admettre que l'intervention de la régulation stomatique et cuticulaire à la suite d'un déséquilibre hydrique momentané entraîne une limitation de la production de matière sèche. Le rendement optimal, toutes autres conditions restant égales, serait donc obtenu en maintenant constamment ETP_{max} inférieure à Q_{max}. On a vu par ailleurs que cette condition devait être remplie à toutes les échelles (ponctuelle, locale et climatique).

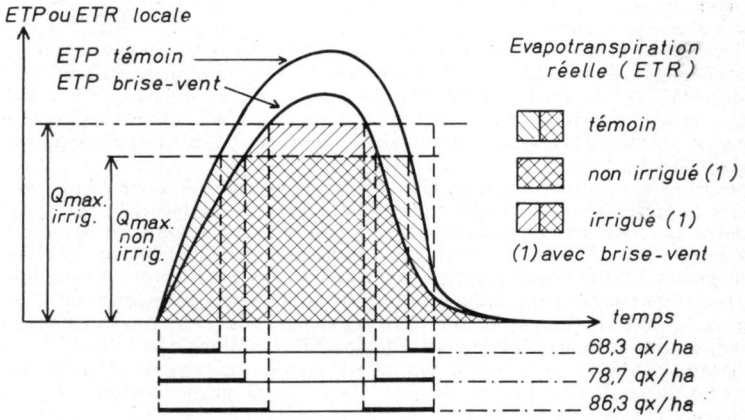


FIG. 2

Pour réaliser cette condition, on peut agir soit sur les paramètres qui commandent Q_{max} (développement radiculaire, humidité du sol, vitesse de dessèchement), soit sur ceux commandant ETP_{max}, soit simultanément sur les deux. La solution qui consiste à réduire ETP_{max} semble particulièrement séduisante puisque la consommation d'eau aura tendance à diminuer alors que les rendements seront améliorés.

II. — DESCRIPTION ET CONTRÔLE DE L'ESSAI

Pour vérifier cette hypothèse sur le déséquilibre hydrique à une échelle de temps inférieure à la journée et pour juger de son influence sur la photosynthèse, on a réalisé un essai qui consistait à irriguer pour augmenter le débit Q_{max} de la plante et à établir des brise-vent pour réduire l'évapotranspiration potentielle.

En effet, dans les régions subhumides ou sèches, où l'évapotranspiration réelle est inférieure à l'évapotranspiration potentielle, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau sur les zones à plus forte évaporation, provient non seulement du bilan radiatif, mais également de l'air ambiant (apport advectif d'énergie). Dans la plupart des cas, on ne peut pas envisager de réduire le bilan radiatif sans affecter aussi la photosynthèse dans un sens défavorable. Par contre, il est possible de réduire les apports advectifs d'énergie de l'air ambiant en diminuant la turbulence au moyen de brise-vent.

Afin de montrer nettement que, dans les meilleures conditions agricoles, on ne connaissait pas les rendements potentiels des végétaux, on a cherché à éliminer le maximum de facteurs limitants de la production. On se plaçait donc volontairement dans les conditions les plus défavorables à la démonstration de l'hypothèse de travail.

Dans ce but, on a choisi un sol de limon très profond, fertile, offrant de grandes disponibilités en eau et l'expérience a porté sur un blé d'hiver déjà très hautement productif et ayant la réputation de bien résister à la sécheresse. L'essai fut effectué dans les conditions de grande culture à la ferme expérimentale de La Minière ([1]), plateau situé à 160 m d'altitude, à 10 km au sud-ouest du C. N. R. A. de Versailles), sur un champ de 1,3 ha pris dans une zone de plusieurs dizaines d'hectares cultivée en céréales.

Cette expérience comprenait trois traitements : un témoin correspondant à une culture de blé classique, deux traitements avec évapotranspiration réduite par des brise-vent dont l'un était irrigué. Le manque de terrain empêcha de faire un traitement avec irrigation sans brise-vent et on peut évidemment le regretter. Chaque traitement comportait cinq répétitions. Les parcelles élémentaires mesurant 10 mètres carrés étaient incluses dans le champ sans discontinuité.

Les brise-vent artificiels étaient constitués de films continus de polyéthylène (12/100) transparent, installés verticalement autour de chaque parcelle sans laisser d'espace libre de végétation. Le niveau supérieur du brise-vent, variable au cours du temps, était maintenu à 30 centimètres au-dessus du sommet de la végétation par un jeu de cornières mobiles. Ces brise-vent, utilisés uniquement à titre expérimental, sont d'ailleurs moins efficaces que les brise-vent présentant une certaine porosité, tels que les brise-vent naturels. Effectivement, les mesures ont montré que l'évapotranspiration potentielle locale n'a été que faiblement réduite (diminution de 15 p. 100 environ).

L'irrigation par aspersion était réalisée au moyen de tubes plastiques perforés et mobiles, placés au-dessus de la végétation ; la dose était définie chaque semaine de manière à combler le déficit en eau du sol, calculé à partir des mesures expérimentales faites sur évapotranspiromètres. En fait, on a maintenu un certain déficit en eau du sol pour éviter tout accident (asphyxie possible en cas de pluies abondantes).

Le dispositif expérimental fut mis en place durant la première semaine de mai. La montaison du blé, variété *Cappelle* semée fin octobre 1961, était largement commencée et le tallage épis ne fut donc pas affecté par les différents traitements. Enfin, bien qu'il s'agisse de récoltes portant sur de de petites parcelles, ces dernières ont été tirés au hasard et délimitées sur un champ dans les conditions de grande culture sans précautions particulières. Les rendements ne sont donc pas artificiellement augmentés par des soins culturaux spéciaux ou des effets de bordure liés à la parcelle.

Ce dispositif était complété par un abri météorologique et des évapotranspiromètres couverts de gazon et entourés d'un anneau de garde pour obtenir ETP climatique. Dans l'essai lui-même ont été faites des mesures physiques de contrôle portant sur chaque traitement (évaporation potentielle ponctuelle, température de l'air, profil d'humidité du sol) ainsi que des mesures biologiques (transpiration ponctuelle et transpiration relative, indice foliaire).

III. — ANALYSE BIOMÉTRIQUE

Cet essai a été réalisé au moyen de cinq répétitions ou « blocs » alignées suivant une direction nord-sud. Chaque bloc a été subdivisé en deux sous-blocs, l'un à l'est, l'autre à l'ouest. Trois parcelles ont été constituées dans chaque sous-bloc : une parcelle traitée, entourée de brise-vent, une parcelle

([1]) Nous tenons à remercier tout particulierement M. Félix, chef du Service de l'Expérimentation à la Minière pour l'aide très importante apportée à la réalisation de cet essai.

témoin associée à la parcelle traitée, c'est-à-dire située à la distance minimale pour que les effets des brise-vent puissent être supposés négligeables, enfin une autre parcelle témoin destinée seulement à vérifier l'homogénéité du champ d'essai. Dans chaque bloc une des deux parcelles traitées était irriguée.

Malgré les précautions prises, il était intéressant de tester un effet éventuel des brise-vent sur les parcelles témoins. Le vent dominant étant de secteur W et SW, on a testé si une différence pouvait être constatée entre les dix témoins placés sous le vent (sous-bloc est) et les dix autres placés dans le vent (sous-bloc ouest). Les rendements moyens observés étant respectivement 68,77 q/ha et 67,73 q/ha, l'analyse a montré que cette différence était non significative.

L'analyse elle-même ne pouvait tester simultanément de façon valide les deux effets principaux (brise-vent et irrigation) et leur interaction, du fait de l'absence de la combinaison « irrigation sans brise-vent ». D'autre part, la disposition systématique de témoins associés aux parcelles traitées ne permettait pas un test global des effets des trois modalités : témoin, brise-vent irriguée, brise-vent non irriguée.

Une première analyse concerne uniquement le contraste entre ces deux dernières modalités. Les rendements moyens observés ont été de 78,70 q/ha pour les parcelles avec brise-vent sans irrigation et 86,36 q/ha pour les parcelles avec brise-vent irriguées. La différence due à l'irrigation est de 7,65 q/ha. Elle est supérieure à la plus petite différence significative (5,54 q/ha) ; l'effet de l'irrigation est donc significatif. D'autre part, les différences entre répétitions restent au-dessous du seuil de signification.

Cependant, le semis ayant été réalisé dans les conditions de culture normale, les variations inévitables de densité de peuplement auraient pu fausser les rendements des parcelles. Or la régression de cette densité sur les rendements est non significative ($F = 2,02$) et il n'y a pas lieu de corriger les rendements par une analyse de covariance. Pour la même raison, aucune correction n'était nécessaire en fonction des rendements des témoins associés aux parcelles traitées. Ce dernier résultat confirme l'homogénéité satisfaisante du terrain expérimental.

Une deuxième analyse a permis de tester la différence entre les témoins et un des traitements. La différence entre le rendement des cinq parcelles avec brise-vent non irriguées (78,70 q/ha) et le rendement des cinq parcelles avec brise-vent non irriguées (78,70 q/ha), et le rendement des cinq témoins associés (67,78 q/ha), soit 10,92 q/ha, se révèle significative. A plus forte raison, la différence (19,81 q/ha), entre l'autre traitement (86,35 q/ha) et les témoins correspondants (66,54 q/ha) est-elle significative.

IV. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats figurent dans le tableau 1. Il donne pour les trois traitements : les rendements en grains ramenés à 15 p. 100 d'humidité, les bilans hydriques, l'efficience de l'eau et les contrôles physiologiques. L'analyse statistique dont le détail figure ci-dessus a montré la haute signification des différences observées entre les rendements.

La récolte excellente sur les parcelles témoins (68,3 q/ha) correspond à celle de l'ensemble du champ (69 q/ha). Elle a donc une valeur nettement significative et représente bien le rendement dans les conditions de grande culture. Cette valeur de 69 quintaux par hectare constitue d'ailleurs le maximum absolu enregistré pour cette variété sur la ferme de La Minière. Malgré les conditions très favorables de l'année 1962, la simple modification de l'« offre » et de la « demande » a pu faire varier les rendements de 15 à 26 p. 100. On remarquera que la consommation d'eau a diminué dans les traitements avec brise-vent alors que les rendements ont augmenté ; l'efficience de l'eau varie ainsi de 30 p. 100.

L'interprétation de ces résultats, à première vue déroutants, peut se faire, grâce à notre hypothèse de travail, à partir du schéma présenté dans la figure 2. Les débits Q_{max} correspondant au cas des parcelles irriguées et non irriguées que l'on a arbitrairement représentés, sont dans un ordre de classement semblable à

TABLEAU I

Blé « Cappelle(1) *» – La Minière* 1962
(3 *traitements*, 5 *répétitions*)

	Témoin	Réduction de l'évapotranspiration potentielle	
		Non irrigué	Irrigué
I. — Rendement moyen			
q/ha, humidité 15 %	68,3 (100)	78,7 (115)	86,3 (126)
Poids de 1 000 grains en g	53,1	53,3	51,8
II. — Bilan hydrique (2) échelle locale			
Pluie en mm	93	93	93
Irrigation en mm (9 apports)	0	0	186
Prélèvement dans le sol	320	280	110
Eau totale consommée environ	410	370	390
III. — Efficience de l'eau			
Rapport Eau totale consommée/Poids de grains	605	470	450
IV. — Données physiologiques			
Rapport Transpiration instantanée/Évaporation instantanée	0,22 (100)	0,25 (114)	0,29 (131)
Indice foliaire (1-7-62)	4,4	4,7	5,3

(1) Précédent cultural : betterave ou maïs avec 60 tonnes de fumier par hectare et 1 200 kg de phosphopotassique. Fumure sur blé : 500 k scories 12-12, 30 unités d'azote au semis, 60 kg en couverture (ammonitrate).

(2) Bilan du 20 avril au 26 juillet. Le 20 avril le sol était à la capacité de rétention sur tous les profils. La précision des profils hydriques du sol le 26 juillet ne permet pas d'affirmer que l'écart entre le témoin (320 mm) et le traitement « brise-vent » « non irrigué » (280 mm) est significatif. L'évapotranspiration potentielle climatique entre le 20 avril et le 26 juillet était de 281 mm à Versailles et de 418 mm à La Minière.

(3) Moyenne sur une trentaine de journées de mesure (mesures effectuées entre 14 et 16 h). Ce rapport correspond au terme transpiration relative dans les articles de R. J. Bouchet et S. de Parcevaux du présent volume.

celui des mesures de transpiration instantanée. Les surfaces hachurées représentent les consommations réelles d'eau pour les différents traitements au cours d'une journée-type : elles se classent dans le même ordre que les bilans portant sur l'eau totale consommée (410, 370, 390 mm). Les trois traitements aboutissent bien à des durées de régulation stomatique très différentes au cours de la journée. Le rapport T/E confirme d'ailleurs parfaitement l'intensité de cette régulation stomatique durant les heures les plus chaudes. Ces phénomènes suffisent à justifier l'écart des rendements (68,3, 78,7, 86,3 q/ha).

Ainsi le schéma proposé (fig. 2) permet de comprendre comment le rendement des végétaux peut s'améliorer en dépit d'une consommation d'eau plus faible.

Ces résultats ne peuvent pas s'interpréter comme résultant d'un décrochement de l'évapotranspiration réelle par rapport à l'évapotranspiration potentielle à

partir d'une date correspondant à un certain état de desséchement du sol pour deux raisons : 1° les mesures de transpiration sur les trois traitements montrent clairement que la régulation stomatique peut intervenir chaque jour quel que soit le déficit en eau du sol durant toute la période végétative ; 2° le tallage épi était identique dans les différents traitements ; ce fait s'explique dans le cas présent par la date tardive du début de l'essai (début mai). Les variations de rendement sont finalement dues à la fertilité de l'épi et non au poids du grain comme le montre le tableau 1. Après la fécondation, une meilleure activité photosynthétique a permis à la plante de nourrir un nombre de grains plus grand jusqu'à l'optimum de cette variété.

L'évapotranspiration potentielle agit donc comme facteur limitant de la production de matière sèche et peut faire sentir son action sur divers facteurs du rendement.

On remarque que le témoin a évaporé une quantité d'eau voisine de ETP climatique grâce à la très large utilisation des réserves du sol (320 mm). Selon les critères généralement retenus, ce blé n'avait pas souffert de la sécheresse puisque ETR était sensiblement égale à ETP. Le rendement de 68,3 q/ha par ailleurs excellent, confirmerait cette conclusion. On pouvait considérer que l'on était à l'optimum pour cette variété et ce terroir. Les traitements avec réduction de ETP locale montrent que les potentialités n'étaient pas toutes exprimées.

Les parcelles de l'essai se trouvaient dans un climat général semblable. Les températures étaient légèrement plus basses (écarts non significatifs) dans les parcelle· avec brise-vent par suite de la diminution de l'énergie advective, le thermopérios disme quotidien et les phénomènes de rayonnement étaient identiques. La photosynthèse et les phénomènes de translocation auraient donc dû être les mêmes. Seule, l'évapotranspiration potentielle variait et le mode d'apport d'eau à la plante. On constate que la très légère modification de l'évapotranspiration potentielle locale a suffi pour modifier très sérieusement non seulement l'économie de l'eau et son efficience, mais également le niveau de production du végétal.

V. — CONCLUSIONS

Cet essai effectué dans les conditions agricoles sur une espèce parvenue à un certain optimum agronomique constitue, malgré son caractère global, une vérification de l'hypothèse de départ que l'on a par ailleurs exposé dans les articles déjà cités. Celle-ci résultait d'une série d'observations et de données expérimentales convergentes, portant sur différentes espèces cultivées sous des climats différents.

Sans méconnaître l'influence directe ou indirecte de nombreux paramètres physiques ou biologiques, les conclusions de cet essai sont susceptibles d'être étendues à d'autres plantes cultivées. Ainsi on peut considérer le problème de l'alimentation hydrique sous l'angle d'un équilibre ou d'un déséquilibre de chaque instant entre « l'offre » et la « demande » en eau. Le rendement maximum en matière sèche correspondrait, toutes autres conditions restant égales, à un équilibre permanent entre le débit susceptible d'être assuré par le végétal et l'évapotranspiration potentielle instantanée locale.

Même dans des régions subhumides et dans des conditions climatiques moyennes, les plantes cultivées dans les meilleures conditions apparentes peuvent subir un déséquilibre hydrique quotidien. L'évapotranspiration potentielle maximale au cours de la journée apparaît alors comme un facteur limitant de la production agricole qui masque d'autres potentialités génétiques ou agronomiques. Il est donc probable que l'on ne connaît pas actuellement les rendements potentiels des végétaux cultivés par suite de ce déséquilibre de quelques heures par jour dans l'alimentation en eau.

L'existence de ce facteur limitant montre l'intérêt qu'il y aurait à mieux connaître ces variations dans le temps ou l'espace. On observe en effet pour une période estivale de trois mois une variation de ETP climatique supérieure à 50 p. 100 d'une année à l'autre à Versailles (1958-1959) et une même fluctuation de 50 p. 100 en 1962 entre Versailles et la Minière distants de 10 km.

On s'explique alors facilement, toutes autres conditions restant égales (climat général, sol, technique culturale), les larges variations observées dans les rendements d'une année à l'autre entre deux régions voisines (exemple : sud et nord du Bassin parisien). Ce raisonnement s'étend à fortiori à la comparaison de deux pays situés sous des latitudes différentes (exemple : nord de la France et Hollande). De même, les excellents rendements de certaines années seraient dus à une longue période végétative avec de relativement faibles pouvoirs évaporants instantanés dus à un écrêtage naturel (exemple : excellents rendements en céréales en France en 1933 ou 1962).

Pour s'affranchir de ce déséquilibre hydrique dont souffre la plante, on peut agir sur l'alimentation en eau grâce à l'irrigation de complément, réduire l'évapotranspiration potentielle ou associer les deux méthodes. La réduction de ETP peut être envisagée de différentes manières : brise-vent naturel d'arbustes, brise-vent artificiel, association de cultures hautes et basses. Il ressort toutefois de ces études que l'on devrait éviter de transformer les zones à forte densité d'arbres en vastes zones découvertes sans effectuer des études préalables sur l'équilibre de l'alimentation en eau. Ainsi la suppression trop systématique des haies ou des talus dans les pays de bocages pourrait aller à l'encontre du but poursuivi en limitant, pour des raisons climatiques, les possibilités de production.

Par ailleurs, même dans les régions où le problème ne semblait pas se poser, on aurait intérêt à remodeler le paysage pour augmenter par des obstacles naturels sa « rugosité » à l'échelle géographique (massifs boisés, rideaux d'arbres), afin de réduire systématiquement ETP_{max} à l'échelle de la journée au niveau des plantes cultivées.

La prise en considération de ce nouveau facteur limitant et les solutions envisagées pour s'en affranchir soulèvent de multiples problèmes agronomiques ; les articles de GUYOT (« Les brise-vent ») et BALDY (« Les cultures associées ») répondent à cette préoccupation. En outre, comme l'a montré cet essai, l'importance des modifications dans la productivité de l'eau pour un faible abaissement de ETP justifie la poursuite d'un ensemble de travaux sur les méthodes à envisager pour modifier le climat et sur les conséquences qu'elles peuvent entraîner.

Reçu pour publication en juillet 1963.

SUMMARY

Improving crop yields by decreasing potential evapotranspiration

The experiment described involved the reduction of potential evapotranspiration by means of a windbreak consisting of film made of plastic material. The experimental plots were in a cultivated field. In conformity with hypotheses propounded by others in various publications, the decrease in potential evapotranspiration produced considerable increases in fields (6.83-7.87 tons/ha) and at the same time reduced the water consumption of the crop. The efficiency of water use consequently increased greatly (605 to 470).

ZUSAMMENFASSUNG

Verbesserung des Ertrags durch Herabsetzung der potentiellen Evapotranspiration

Das hier beschriebene Experiment sollte die pot. Evapotranspiration mittels Windschutz aus Plastfilm verringern. Die Versuchsparzellen, befanden sich inmitten eines grossen Feldes. Wie durch anderweitig geäusserte, und in verschiedenen Berichten dargelegte Annahmen zu erwarten war, führt die Verringerung der pot. Evapotranspiration zu einer wichtigen Zunahme des Ertrags (68,3 bis 78,7 dz/Ha) und gleichzeitig zu einer Verringerung des Wasserverbrauchs durch die Kulturen ; die Wirksamkeit des verbrauchten Wassers ist somit weitgehend verbessert.(605 bis 470)

РЕЗЮМЭ

Увеличение урожайности при помощи уменьшения потенциальной эвапотранспирации.

Р. Ж. БУШЭ и С. ДЭ ПАРСЭВО.

Описанный в данной статье опыт заключался в попытке уменьшения потенциальной эвапотранспирации с помщью ветроломных полос, состоявших из тонких прозрачных экранов сделанных из пластмассы. Экспериментальные делянки в 10 м² были изолированы, таким образом, посреди обширной полевой культуры. Выдвинутые ранее и приведенные в иных местах гипотезы — оправдались, и, уменьшение потенциальной эвапотранспирации, вызвало весьма чувствительное повышение урожайности (с 68,3 до 78,7 цент./га для пшеницы), и в то-же время уменьшение количеств потребленной растениями влаги; таким образом достигнуто было крупное повышение эффективности потребленной влаги.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 835-848

TRANSPIRATION ET MATURATION DU BLÉ DANS LE LANGUEDOC MÉDITERRANÉEN

M. GODARD

Station de Bioclimatologie agricole, (1)
Centre de Recherches agronomiques du Midi, Montpellier (Hérault)

SOMMAIRE

La transpiration journalière du blé au cours de la maturation est étudiée en fonction des facteurs physiques du climat par la méthode des vases de végétation.

Un taux de transpiration de la plante est défini. Il permet de suivre l'évolution de l'activité transpiratoire liée aux processus de maturation affectant l'ensemble de la plante. L'influence des journées à conditions physiques excessives est également précisée.

La transpiration des épis est en outre étudiée par une technique appropriée. L'activité transpiratoire de ces derniers passe par ses valeurs maximales au cours de la période où se produit le stade du « palier de l'eau » des grains. Pour un même complexe climatique, les pertes d'eau transpirée par les épis sont alors les plus élevées.

I. — INTRODUCTION

On tentera dans la présente note de préciser l'action du climat sur la transpiration du Blé pendant la phase de maturation.

Les essais effectués à Montpellier au cours de différentes années portèrent tout d'abord sur diverses variétés de pays, puis furent poursuivis sur la variété *Ariana 8* qui sera l'objet de cette étude.

Au cours de la phase de maturation, l'élaboration des organes végétatifs de la plante est achevée et les produits photosynthétisés se dirigent essentiellement en direction des épis. En outre, aux approches de la fin de végétation, une phase ultime de migrations dirige également une partie des matériaux contenus dans les organes végétatifs vers les grains. Contrairement à la phase d'élongation et de développement qui précède lors de la montaison, la phase de maturation apparaît ainsi essentiellement une période active de transport de substances vers des organes, les épis, dont les dimensions restent relativement peu variables et où les composés ainsi déplacés viennent se condenser dans les grains.

(1) Domaine de Bel-Air, chemin de la Paillade à Montpellier.

L'accroissement pondéral considérable de la masse des grains par rapport à l'ensemble de la plante qui en résulte au cours de la maturation implique ainsi une alimentation locale en sève particulièrement intense. On peut donc faire l'hypothèse que celle-ci doit contribuer activement à la transpiration dont les épis sont le siège. Aussi, en dehors des études relativement à la transpiration de *l'ensemble de la plante*, avons-nous jugé utile de chercher à préciser également l'influence des conditions du climat méditerranéen sur la *transpiration des épis* eux-mêmes et son évolution au cours de la maturation.

Les expériences furent organisées afin d'obtenir des données journalières et les transpirations observées étaient comparées aux éléments climatiques correspondants. A cette échelle, l'action du milieu physique sur le phénomène transpiratoire pouvait être ainsi mieux mise en évidence.

II. — MÉTHODES ET MATÉRIEL UTILISÉS

La méthode des vases de végétation

La méthode des vases de végétation a été utilisée ; malgré ses inconvénients, cette méthode était la seule capable de fournir des données journalières suffisamment précises.

Les vases de 20 centimètres de diamètre contenaient 6 kg de terre avec forte fumure et comportaient trois plantes par pot. Ces vases étaient exposés aux conditions climatiques extérieures dans le champ d'expériences et placés côte à côte dans une tranchée afin de soustraire leur paroi aux rayons solaires. Leur surface supérieure affleurait le niveau de la surface du sol du champ qui était légèrement engazonné. Les différents organes végétaux se trouvaient donc dans des conditions analogues à celles correspondant à une situation de bordure et l'ensemble des plantes était soumis pleinement au rayonnement solaire et aux échanges thermiques advectifs.

De fréquentes adjonctions d'eau en cours de journée permettaient de maintenir l'approvisionnement hydrique des plantes. Cette eau était ajoutée par un tube jusqu'au fond des vases dont la surface du sol restait ainsi sèche. Des mesures faites sur un vase sans végétation maintenu dans les mêmes conditions d'humidité ont montré que la perte d'eau évaporée ainsi par le sol proprement dit était très faible.

La période des essais en juin-juillet chaque année commençait peu après la floraison générale et s'étendait jusqu'à la maturité. Des pesées journalières permettaient de connaître la transpiration diurne des plantes entre 5 heures et 19 heures T. U., soit pendant un laps de temps de quatorze heures. A l'époque des expériences, en juin-juillet, cette période de la journée atteint 91 à 93 p. 100 de la durée du jour à Montpellier et la quantité d'eau transpirée par les plantes au cours de cette période comprend la quasi-totalité des pertes d'eau au cours du nycthémère.

La transpiration des épis : technique utilisée

Des lots comprenant sept à dix vases chacun, étaient constitués. Ces lots étaient formés de vases choisis comprenant des plantes présentant un même aspect du feuillage et un nombre égal d'épis.

Deux lots étaient préalablement comparés quelques jours entre eux de façon à s'assurer que leurs transpirations moyennes étaient très voisines. Sur l'un des lots, tous les épis étaient alors coupés à leur base ; les tiges sectionnées étaient ensuite légèrement enduites de paraffine à leur extrémité afin d'obturer la plaie ainsi provoquée. L'autre lot était gardé comme témoin correspondant aux plantes normalement pourvues de leurs épis ou plantes entières. Les quantités d'eau transpirées par les deux lots au cours des journées qui suivaient devenaient alors très différentes ; pour chaque jour, la différence des transpirations entre les témoins et les plantes sans épis a été alors considérée comme représentant la transpiration des épis au cours de la journée.

Toutefois, à cette époque de la vie de la plante, l'enlèvement des épis provoque une restriction des courants de migrations et l'évolution du feuillage des plantes sans épis apparaît moins rapide par rapport aux plantes avec épis. Aussi, pour avoir des lots présentant des feuillages aussi comparables que possible, il était nécessaire de renouveler fréquemment les séries. Le lot de plantes sans épis était donc abandonné au bout de quelques jours et l'expérience était continuée avec une nouvelle série subissant le même traitement.

Récoltes obtenues

Afin de préciser le matériel utilisé, le tableau 1 donne pour les deux années 1957 et 1962 la composition des récoltes moyennes relatives à un vase et qui correspondirent à 26 épis environ par vase.

TABLEAU I

Récoltes par vase. Matière sèche en grammes

Années	Grains	Glumes et rachis	Tiges, feuilles et gaines	Total	*Rapport* Grains/Pailles
1957	23,40	8,20	21,72	53,32	0,78
1962	24,49	8,50	20,17	53,16	0,85

D'une année à l'autre, les poids des divers organes sont restés à des valeurs sensiblement voisines autorisant ainsi les comparaisons indépendamment de l'année.

Les vases ayant vingt centimètres de diamètre, soit 314 cm² de surface, les récoltes précédentes correspondent à un rendement théorique à l'hectare de l'ordre de 75 quintaux de grains secs. Les cultures, normales d'aspect, ne présentaient pas de caractères particulièrement exubérants et la projection du contour extérieur de la végétation de chaque vase sur le plan horizontal ne dépassait pas sensiblement le périmètre de chaque vase. Aussi, ce chiffre élevé de récolte apparaît directement en rapport avec l'alimentation en eau suffisante et la culture en vase qui favorise un éclairement maximum des plantes.

Les quantités d'eau transpirées

Les quantités d'eau transpirées par les plantes entières, variables selon les caractères de chaque journée, sont élevées : peu après la floraison, elles peuvent atteindre certains jours 650 à 750 cm³ par vase. Compte tenu de la surface des vases (314 cm²), il leur correspond une hauteur d'eau évaporée de l'ordre de 20 à 25 mm. La cause de cette forte valeur de la transpiration ainsi calculée en millimètres de hauteur d'eau n'était pas déterminée par un développement exagéré des cultures dont l'aspect fut normal comme nous venons de le rappeler. Elle est évidemment en relation avec les conditions microclimatiques où se trouvaient les plantes.

Ces valeurs élevées traduisent la consommation d'eau importante déterminée par l'effet de bordure augmentant les échanges énergétiques du milieu extérieur avec les différents organes végétaux. Ces fortes transpirations sont inhérentes à l'utilisation de la méthode des cultures en vases et ne prétendent pas évidemment fournir une évaluation de l'évapotranspiration d'une culture de plein champ, ce qui serait ici hors de propos en raison du dispositif expérimental adopté. Les données ainsi obtenues se prêtent cependant bien, ainsi que nous le verrons plus loin, à leur interprétation en fonction des caractères climatiques, variables d'un jour à l'autre, objet de la présente étude, montrant ainsi la validité de la méthode adoptée pour le but poursuivi.

Ces valeurs élevées de la transpiration ainsi observée soulignent cependant ici sous les conditions du climat méditerranéen où le rayonnement est généralement très intense, la possibilité de fortes transpirations du blé encore au stade du début de la maturation et suffisamment approvisionné en eau, si l'énergie nécessaire est toutefois disponible.

III. — TRANSPIRATION ET MILIEU PHYSIQUE

Choix des données climatiques : l'évaporométrie journalière

Les données journalières relatives à la transpiration des plantes ont été étudiées en fonction des conditions d'évapotranspiration potentielle afférentes à chaque journée. Pour caractériser l'évapotranspiration potentielle journalière, on a utilisé

l'évaporomètre de Piche placé sous l'abri météorologique, et l'évaporation ainsi mesurée entre 5 heures et 19 heures, intervalle des pesées des vases a été considérée. On sait qu'une telle donnée n'est pas directement proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle. Aussi, l'évaporation brute ainsi déterminée a tout d'abord été corrigée suivant le modèle proposé par R. BOUCHET (1960 *a*, *b* et 1963). Rappelons que cette méthode permet de calculer, connaissant en outre le point de rosée et la température de l'air, quelle serait l'évaporation, *Ec*, du disque de l'évaporomètre si la surface de ce disque était maintenue à la température de l'air. Les températures des surfaces végétales, siège de la transpiration, étant voisines elles-mêmes de la température de l'air, l'évaporation *Ec*, ainsi déterminée ou évaporation corrigée traduit alors, à un facteur constant près [1] les conditions d'évapotranspiration potentielle liées aux éléments climatiques au cours de chaque journée. Nous écrirons donc par la suite indifféremment *évaporation corrigée* ou *pouvoir évaporant* pour désigner la quantité *Ec* ainsi calculée.

C'est cette valeur, *Ec*, qui a été choisie comme donnée de référence pour caractériser chaque jour le milieu physique en fonction duquel a été étudiée la transpiration. A cette donnée se surajoute en outre dans le cas de nos essais en vases, l'action supplémentaire due localement à l'apport vers les plantes d'énergie solaire et thermique, lié à l'effet de bordure. Cet effet, analogue à un effet de minuscule oasis et qui accroît la transpiration, est difficile à apprécier quantitativement. Aussi, pour en tenir compte, on a retenu dans cette étude seulement les *journées claires ou peu nuageuses*.

TRANSPIRATION DE LA PLANTE ENTIÈRE ET POUVOIR ÉVAPORANT

Tout d'abord, afin de tester le choix des données, la transpiration journalière des plantes entières, c'est-à-dire normalement pourvues de leurs épis, a été comparée au pouvoir évaporant *Ec*.

A l'époque où commencèrent les essais, le feuillage des plantes tend à évoluer rapidement en raison des processus concourant à la maturation des grains. Aussi, les plantes ne restent sensiblement comparables à elles-mêmes d'un jour à l'autre que pendant un assez court laps de temps. Un nombre relativement restreint de jours a donc pu tout d'abord être retenu pour cette étude au cours des deux années utilisées ici.

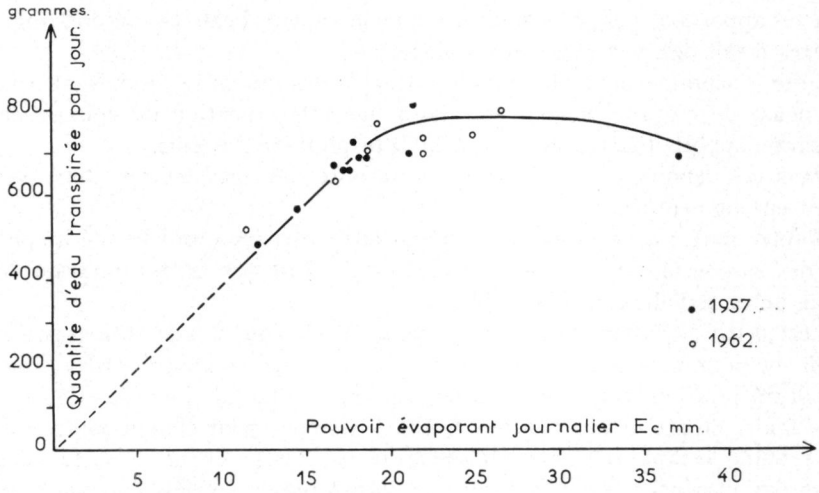
Le graphique 1 résume les observations effectuées. On a porté en abcisses les pouvoirs évaporants journaliers *Ec* et en ordonnées, les quantités d'eau transpirées correspondant à un vase.

Tout d'abord, lorsque *Ec* augmente, les points représentatifs se placent sur une courbe rectiligne ascendante, d'une manière assez étroite si l'on tient compte qu'il s'agit de deux années différentes. Cette ligne traduit ainsi une relation sensiblement linéaire entre le pouvoir évaporant et la transpiration. Jusqu'à des valeurs de l'ordre d'une vingtaine de millimètres pour *Ec*, les points s'alignent régulièrement sur la courbe. Les plantes qui, rappelons-le, sont bien pourvues en eau répondent donc encore bien par leur transpiration à l'action du milieu physique au cours de telles journées.

[1] E_c correspond au terme (E_a) *piche* dans le texte de R. J. BOUCHET. E_c n'est évidemment pas l'ETP climatique quotidienne. Le facteur constant de proportionnalité entre ETP et E_c égal à 0,37 (pour 24 h) en zone subhumide (Versailles) a bien entendu ici une valeur différente, sans qu'il soit actuellement possible de la préciser (voir ce N° des *Annales agronomiques*, p. 794 à 796).

Cependant, pour les journées au cours desquelles le pouvoir évaporant *Ec* atteint 20 à 22 mm, les points représentatifs se placent moins uniformément : la transpiration devient irrégulière, traduisant ainsi des à-coups dans la végétation causés par les processus de régulation sous l'action d'un milieu physique plus desséchant. Ces points amorcent une cassure dans la courbe d'accord.

En effet, au-delà, lorsque le pouvoir évaporant atteint des valeurs encore plus élevées, la courbe représentative marque un palier montrant que pour ces conditions plus sévères, la transpiration des plantes ne « suit » plus le milieu climatique. Il en est ainsi pour les points situés à droite du graphique. Les journées correspondantes furent généralement marquées par un fort vent du nord-ouest amenant sur la région des masses d'air chaudes et à déficit de saturation élevé. C'est le cas notamment pour le point à l'extrême droite, relatif au 9 juillet 1957 pour lequel *Ec*



GRAPH. 1. — *Montpellier* — 1957-1962. *Blé, variété* Ariana 8. *Transpiration journalière et pouvoir évaporant journalier.* — *Données rapportées à un vase de végétation*

atteignit 37 mm. Malgré l'alimentation en eau pourtant assurée, ce palier de la courbe montre qu'un transit suffisant de l'eau dans les plantes n'a pu s'effectuer. De telles journées de mistral, fréquentes dans le Midi, correspondent ainsi à des conditions trop fortes d'évapotranspiration potentielle et doivent normalement se traduire par une faible assimilation.

L'ensemble des résultats souligne la possibilité de l'utilisation de l'évaporation corrigée déterminée à partir de l'évaporomètre de Piche pour étudier les phénomènes transpiratoires du blé à l'échelle de la journée. Il en montre également les limites de validité, liées à la capacité de transfert de l'eau du sol vers l'atmosphère par la plante elle-même. C'est ainsi qu'à une même quantité d'eau transpirée peuvent correspondre deux types de journées évidemment très différentes par leurs effets sur le bilan d'assimilation : les unes favorables, de pouvoir évaporant relativement modéré, les autres défavorables à la culture et correspondant à des journées de vent ou de fortes températures, corrélatives de conditions excessives d'évapotranspiration potentielle.

IV. — ÉVOLUTION DE LA TRANSPIRATION AU COURS DE LA MATURATION

La transpiration des épis

L'évolution des épis vers la maturité doit normalement se traduire dans l'intensité transpiratoire de ces derniers. En effet, morphologiquement, au fur et à mesure que les grains augmentent de volume, les épillets tendent à s'entrouvrir, les glumelles des grains médians se trouvent mieux dégagées. La surface transpiratoire plus grande ainsi offerte à l'air et au rayonnement solaire par les différentes enveloppes facilite les apports d'énergie et la diffusion de la vapeur d'eau, ce qui doit augmenter les pertes d'eau des épis vers l'atmosphère.

Enfin, l'accroissement plus rapide du poids des grains se produisant au milieu de la phase de maturation doit être lié à une intensification du courant de sève favorisant l'apport d'eau nécessaire à la transpiration des épis.

Dans ces conditions, l'activité transpiratoire des épis devrait donc aller tout d'abord en augmentant.

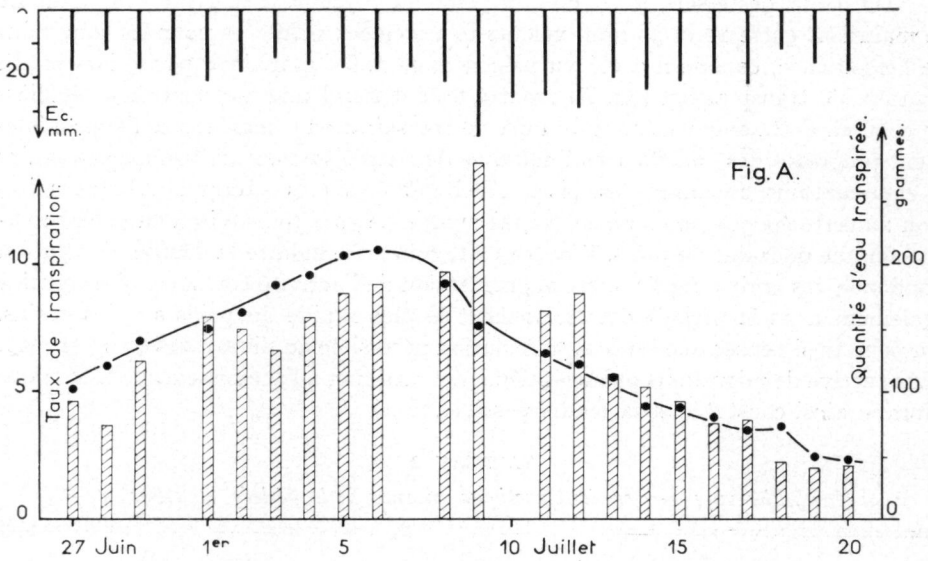
D'autre part, en fin de période, quand la maturité s'approche, l'état physiologique des épis se modifie rapidement et il est évident que la transpiration des épis presque mûrs doit devenir très faible.

C'est cette évolution de l'activité transpiratoire que l'on a tenté de préciser. Le pouvoir évaporant de l'air *Ec* a de nouveau été pris comme test des conditions d'évapotranspiration potentielle correspondant à chaque journée. Cette fois-ci, afin de tenir compte de la variation de l'état des épis, pour chaque journée d'expérience retenue le rapport *Quantité d'eau transpirée par les épis : Ec* a été calculé. Ce rapport définit ainsi le *taux journalier de transpiration des épis* correspondant à la moyenne d'un vase, relativement à *Ec*. Ce mode de calcul permet ainsi de tenir compte du climat et d'obtenir, par conséquent, des données plus caractéristiques de l'influence de l'état d'évolution des épis sur leur activité transpiratoire.

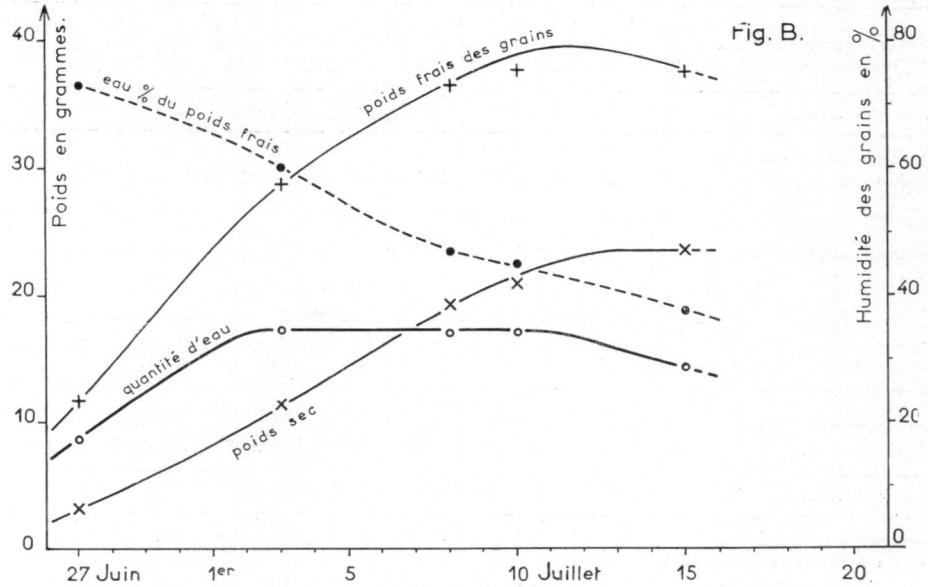
Le graphique 2 se rapporte à 1957 où les journées claires furent particulièrement nombreuses à l'époque des essais. Sur la figure A ont été notées les dates en abcisses. En ordonnées, on a porté les taux de transpiration correspondants (points ronds noirs, échelle marquée à gauche). On a également indiqué sur la même figure les quantités journalières d'eau transpirée par les épis, correspondant toujours à la moyenne d'un vase, à l'aide de rectangles hachurés (échelle marquée sur l'axe de droite). Enfin, les valeurs journalières de *Ec* en millimètres ont été indiquées tout en haut de la figure.

Sur la partie basse du graphique 2, figure B, ont été indiquées différentes données biologiques permettant de repérer les stades atteints par les épis aux différentes époques de la maturation. On a utilisé les données relatives aux grains de l'ensemble des épis d'un vase moyen : les poids frais et sec des grains ainsi que leur humidité en p. 100 de poids frais ; enfin, la quantité totale d'eau présente dans les grains au cours de leur évolution a été indiquée. La floraison des épis eut lieu à partir du 16 juin.

Enfin, le tableau 2 présente différentes données climatiques journalières pour



GRAPH. 2. — *Montpellier* — 1957. *Épis de Blé. Var.* Ariana 8
FIG. A. — *Quantités d'eau* Q *transpirée journellement par les épis et taux de transpiration* Q/Ec
Données rapportées à un vase de végétation



GRAPH. 2 FIG. B. — *Évolution des grains*
Données rapportées à un vase de végétation

la période des observations. Sauf la journée du 10 juillet où le ciel resta très couvert jusqu'au début de l'après-midi et qui pour cela n'a pas été retenue ici, le temps fut très beau, marqué au milieu de la période par trois journées de chaleur du 6 au 9 juillet.

Du début des essais, le 27 juin, et jusqu'au 8 juillet le pouvoir évaporant *Ec* se maintient entre 10 et 20 mm, valeurs relativement modérées pour les conditions de l'expérience, comme il a été vu précédemment. Le graphique par points relatif au taux de transpiration (fig. A) montre tout d'abord une augmentation régulière de celui-ci. Cette augmentation du taux de transpiration coïncide avec l'épanouissement progressif des épillets sous l'influence de l'accroissement de volume des grains et exposant ainsi davantage les épis aux facteurs physiques déterminant la transpiration : à cette époque, le volume des grains varie de 30 à 100 environ en valeur relative en une douzaine de jours. D'autre part, comme le montre la courbe d'évolution pondérale des grains (fig B), cette augmentation de l'activité transpiratoire coïncide également avec la période d'accroissement le plus rapide du poids sec des grains. On peut ainsi penser que l'intense circulation nécessitée au niveau des épis par cette phase active de migrations puisse également contribuer à l'accroissement de la transpiration ainsi constatée et la rendre possible.

TABLEAU 2

Montpellier 1957 — *Données climatiques au cours de la période des essais*

Dates	Juin				Juillet							
	27	28	29	30	1er	2	3	4	5	6	7	8
Température maximum de l'air (°C)	27,0	26,5	28,7	30,0	31,0	29,0	28,5	29,5	29,3	30,2	30,0	32,0
Ec en mm	18,1	12,1	17,7	19,8	21,3	18,5	14,4	16,6	17,2	17,5	16,9	21,0
Rayonnement global journalier (cal-g/cm²)	740	714	709	703	697	691	658	692	691	706	709	684

Dates	Juillet											
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Température maximum de l'air (°C)	31,8	25,7	28,0	29,8	28,5	29,0	25,7	25,9	25,9	25,7	24,2	26,0
Ec en mm	37,0	25,9	25,3	29,3	20,1	23,3	21,2	18,9	22,2	11,8	16,0	17,8
Rayonnement global journalier (cal-g/cm²)	687	458	639	711	520	609	732	624	679	524	546	677

Dans ces conditions, le taux de transpiration continue de s'accroître et il atteint ses valeurs maximales tandis que l'humidité des grains évolue entre 60 et 55 p. 100 du poids frais.

Mais, à partir du 8 juillet surviennent quelques journées au cours desquelles le pouvoir évaporant *Ec* devient beaucoup plus élevé (tableau 2). Bien que la transpiration des

épis reste importante, celle-ci ne peut suivre le rythme des conditions d'évapotranspiration potentielle comme le prouve la diminution des taux de transpiration relatifs à ces journées. La courbe représentative a tendance à s'infléchir. Le point se rapportant au 9 juillet notamment accuse une forte dénivellation par rapport aux journées précédentes. C'est qu'il correspond à la journée de vent et de chaleur déjà signalée pour laquelle *Ec* atteignit 37 mm, avec une température maximum de 31,8°. Au cours de cette journée, malgré une perte d'eau considérable, les épis n'ont pu répondre complètement à l'action du milieu physique : c'est ce que traduit la forte réduction du taux de transpiration correspondant.

Les journées suivantes jusqu'au 12 juillet continuent d'être marquées par des pouvoirs évaporants élevés sans cependant qu'ils atteignent la valeur excessive observée au cours du 9. Les quantités d'eau transpirées par les épis restent notables. Toutefois les taux de transpiration afférents deviennent inférieurs à celui relatif à la journée pourtant beaucoup plus sévère du 9. Ceci montre que cette fois-ci les processus de maturité des épis, accélérés par les journées chaudes précédentes, commencent à s'accentuer. La figure B montre d'ailleurs que l'accroissement du poids sec des grains devient beaucoup plus lent, traduisant un ralentissement des courants de migrations annonçant l'approche de la maturité physiologique du grain. On assiste à la fin de la phase de transpiration élevée. Désormais, l'activité transpiratoire va tendre à diminuer progressivement, cette fois-ci essentiellement sous l'influence de l'évolution des épis vers le stade final de la dessiccation.

C'est ainsi qu'à partir du 13, bien que les pouvoirs évaporants deviennent nettement plus faibles, la courbe représentative des taux de transpiration continue cependant à s'abaisser de plus en plus et lors de la phase de dessiccation des grains, l'intensité transpiratoire se manifeste de plus en plus faiblement. Signalons la journée du 18 où une brise marine caractéristique détermina une forte réduction de la valeur de *Ec* (= 11,8 mm) et corrélativement provoqua une réduction de l'eau transpirée. Aussi, pour cette date, le taux de transpiration, traduisant ces conditions de faible évapotranspiration potentielle, s'établit à une valeur relativement plus élevée, masquant ainsi pour cette journée la progression de l'évolution des épis vers la maturité.

Ainsi à travers l'action des facteurs climatiques soulignant la sensibilité des épis aux conditions excessives du milieu physique, apparaît l'évolution de leur activité transpiratoire qui présente notamment un maximum à une certaine époque de la vie des épis.

Intensité transpiratoire des épis et stade phénologique

Rappelons que les travaux de H. Geslin et P. Jonard (1946) ont montré l'existence d'une période de l'ordre d'une dizaine de jours précédant la maturité physiologique, au cours de laquelle la quantité totale d'eau présente dans les grains restait sensiblement constante : la courbe relative à cette quantité d'eau marque ainsi un « palier ». On retrouve bien sur la figure B du graphique 2 ce trait caractéristique. Notons que, grâce à l'alimentation en eau assurée dans les cultures en vases, la phase ultime de déshydratation est ici plus lente que celle que l'on peut observer en plein champ sur la même variété.

La comparaison verticale entre les figures A et B du graphique 2 montre que le au x de transpiration des épis passe par ses valeurs les plus élevées pendant la

période au cours de laquelle se produit le palier de l'eau. L'intensité transpiratoire des épis est donc alors la plus forte pendant cette phase singulière.

Or, c'est précisément durant cette phase du palier de l'eau que les auteurs précités ont montré que les grains étaient les plus sensibles au risque d'échaudage causé par des conditions climatiques sévères. Avant ou après cette phase, l'action de ces dernières semble sans effet apparent sur le développement du grain. Elle s'accuse au contraire durant cette phase (GESLIN et JONARD, 1948).

Il est donc indiqué de souligner la corrélation mise en évidence ici, existant entre la phase de sensibilité des grains à l'échaudage et l'activité transpiratoire des épis qui présente précisément son maximum au cours de cette phase. Pour de mêmes conditions d'évapotranspiration potentielle journalière, le graphique 2 montre que la quantité d'eau transpirée est capable d'augmenter fortement quand on passe de la période précédant le palier de l'eau à l'époque de cette phase critique.

Dans ces conditions, on conçoit qu'en raison de cette intensité transpiratoire plus élevée, les épis des variétés sensibles à l'échaudage puissent alors être plus susceptibles pendant cette phase aux éléments climatiques extrêmes survenant au cours d'une succession de journées sévères et qui tendent ainsi à exagérer leurs pertes d'eau au cours de cette période.

TRANSPIRATION DE LA PLANTE ENTIÈRE ET ÉVOLUTION VERS LA MATURITÉ

On a vu précédemment la relation existant entre la transpiration des plantes entières et le pouvoir évaporant. Cette relation est limitée au début de la période de maturation, avant que l'évolution de la plante n'affecte encore trop fortement sa fonction transpiratoire.

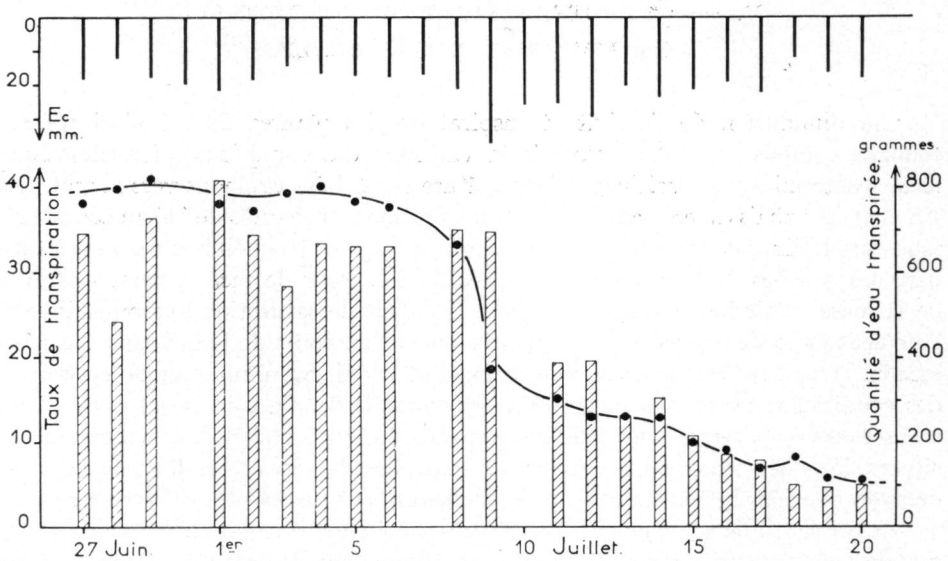
En effet, l'activité transpiratoire globale de la plante entière tend à se restreindre lorsque les grains approchent de leur poids sec final. A ce moment, l'évolution des organes végétatifs restés verts est particulièrement rapide sous l'influence du courant de migrations vers les épis. Le desséchement des feuilles et des gaines se continue vers les étages supérieurs qui tendent à jaunir. L'activité du système radiculaire se modifie également influant sur l'absorption de l'eau. Aussi, les plantes cessent vite d'être comparables d'un jour à l'autre. On a cherché à préciser cette évolution de l'intensité transpiratoire journalière de la plante entière, indépendamment du climat, en suivant la méthode précédemment utilisée pour les épis, toujours pour la même année. Le rapport *Quantité totale d'eau transpirée par la plante* : *Ec* a été calculé pour chaque jour, fournissant ainsi le taux journalier de transpiration de la plante entière.

Le graphique 3 a été construit en portant les dates en abcisses et, en ordonnées, les taux de transpiration correspondants (points ronds noirs, échelle marquée à gauche). Les quantités d'eau transpirée ont également été indiquées par des rectangles hachurés, l'échelle afférente étant à droite. En haut du graphique ont été portées en outre les valeurs du pouvoir évaporant journalier *Ec*, en millimètres, caractérisant chaque journée.

Rappelons qu'en raison de la technique adoptée, les plantes étant pleinement éclairées, l'ensemble du feuillage participait au maximum à la transpiration. Aussi, au début des observations l'allure sensiblement horizontale de la courbe du graphique 3 relative au taux de transpiration des plantes montre que l'influence de l'évolu-

tion vers le dessèchement des organes de la base est sensiblement compensée par l'accroissement du taux de transpiration des épis. Dans l'ensemble, jusqu'au 6 juillet où les pouvoirs évaporants, on l'a vu, restent inférieurs à 20 mm, le taux de transpiration de la plante entière reste peu variable, compte tenu des fluctuations expérimentales. On retrouve dans ces conditions la relation linéaire du graphique 1 relative aux plantes encore éloignées de la maturité, pour des conditions relativement modérées d'évapotranspiration potentielle.

Vers la fin de cette période, les points relatifs au 8 et surtout au 9 juillet se situent plus bas. C'est que, d'une part ils marquent une évolution déjà plus prononcée du feuillage, mais surtout ils correspondent aux journées à forte évapotranspiration



GRAPH. 3. — *Montpellier* — 1957. *Var.* Ariana 8. — *Quantités d'eau* Q *transpirée journellement par les plantes entières de blé et taux de transpiration* Q/Ec. *Données rapportées à un vase de végétation*

potentielle déjà signalées. Le 8, avec $Ec = 21$ mm, appartient au début de la gamme des journées critiques mentionnées précédemment (p.839). Quant au 9 juillet, avec $Ec = 37$ mm, il correspond aux conditions climatiques excessives au cours desquelles la transpiration des plantes n'a pu suivre la marche des facteurs physiques trop intenses : rappelons que cette journée répond au point situé à l'extrême droite du graphique 1. Dans ces conditions, le taux de transpiration s'abaisse principalement pour des raisons écologiques liées aux conditions particulièrement sévères du milieu physique.

Comme on l'a vu précédemment, les journées suivantes jusqu'au 12, continuèrent d'être marquées par des pouvoirs évaporants relativement élevés sans toutefois qu'ils atteignent la forte valeur observée au cours de la journée du 9. Cependant, tous les points représentatifs s'inscrivent en baisse par rapport au taux de transpiration du 9. C'est que certaines des journées chaudes qui se sont succédées depuis le 6 ont accéléré l'évolution de la plante. La dernière phase de migrations vers les grains se produit et les organes foliaires tendent à se décolorer et à jaunir

rapidement sous l'influence de ces processus. Aussi, les quantités d'eau transpirées commencent à diminuer considérablement en valeur absolue. Par voie de conséquence, les taux de transpiration s'abaissent, traduisant essentiellement cette fois-ci la dessiccation progressive de la plante entraînant la réduction de la surface active transpiratoire. La courbe représentative descend de plus en plus. On retrouve pour la journée « marine » du 18 un fait analogue à celui déjà signalé pour les épis. Enfin à l'arrêt des expériences, le taux de transpiration des plantes n'atteint plus que le huitième des valeurs trouvées encore une quinzaine de jours auparavant.

V. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET MATURITÉ DES CÉRÉALES

La diminution de l'activité transpiratoire des plantes de blé ainsi précisée souligne combien doit être marquée la variation des conditions microclimatiques locales déterminées au voisinage d'une culture de céréales évoluant vers la maturité. En effet, cet abaissement rapide de la transpiration des champs de blé au cours de la maturation diminue fortement les quantités de vapeur d'eau émises par ces cultures dans les couches de l'atmosphère voisines du sol. Pour de mêmes caractéristiques de la masse d'air intéressant une région, le déficit de saturation hygrométrique de l'air peut alors s'en trouver grandement augmenté au cours de juillet dans une même localité céréalière. Du point de vue écologique, il doit en résulter un accroissement des conditions locales d'évapotranspiration potentielle. Cela est susceptible d'augmenter les besoins en eau des soles de cultures d'été, maïs ou betteraves par exemple, situées dans des tênements contigus aux parcelles de céréales et d'influencer ainsi défavorablement la végétation de ces cultures, par temps de sécheresse.

A cet égard, le groupement des cultures d'été en surfaces d'un seul tenant aussi grandes que possible apparaît donc particulièrement souhaitable. Ainsi seraient limités à partir de l'époque des moissons les effets d'oasis liés aux phénomènes d'advection, susceptibles d'aggraver les conditions d'évapotranspiration affectant les cultures restant vertes situées à proximité des champs de céréales parvenant à maturité.

VI. — CONCLUSIONS

En résumé, les essais mettent en évidence la sensibilité de la plante à des conditions trop marquées d'évapotranspiration potentielle : même avec une bonne alimentation en eau, la transpiration de la plante et des épis n'arrive pas à suivre, certains jours, le rythme que tendrait à lui imposer l'évolution des facteurs physiques. De telles journées assez fréquentes dans le Midi sont évidemment peu favorables à l'assimilation et aux rendements.

D'autre part, la nette augmentation de l'activité transpiratoire des épis constatée au cours de la période englobant le palier de l'eau affectant les grains peut s'expliquer par l'accroissement de volume des grains provoquant l'épanouissement progressif

des épillets et facilitant ainsi la transpiration des diverses enveloppes ainsi que la diffusion de la vapeur d'eau émise. Il convient également de souligner que cette phase correspond en outre à la période d'intensification des processus de migrations vers les grains, comme le traduit la courbe d'accroissement en substance sèche de ces derniers. Il est vraisemblable que l'appel de sève qui doit alors se produire vers les épis, puisse avoir une relation fonctionnelle avec cette activité transpiratoire plus élevée. L'hypothèse d'une interaction entre ces divers phénomènes est ainsi suggérée.

Reçu pour publication en juin 1963.

SUMMARY

TRANSPIRATION AND MATURATION OF WHEAT IN THE MEDITERRANEAN LANGUEDOC

The pot experiments deal with the daily transpiration of wheat (variety *Ariana 8*) in relation to the conditions of evapotranspiration (ETP) prevailing during the period of ripening under the climatic conditions at Montpellier. The water supply to plants was maintained by frequent additions of water during the day.

The ETP was established by measurements of evaporation under Stevenson screen by means of the Piche evapometer. The measured value corrected by BOUCHET's method yielded the evaporating capacity (*Ec*), used for estimating the daily ETP.

Results show that initially there exists a correlation between the amounts of water transpired and the values of *Ec* (Graph. 1) ; but as soon as the transpiration capacity increases ($Ec > 20$ mm), transpiration increases much slower with an increasing *Ec*. The characteristic curve tends towards a limit, reflecting the unfavourable ecological conditions for the crop ; such days, rather typical for the region, coincide with strong air-currents and high temperatures.

The effect of the stage of plant development during the ripening period on transpiration activity is also discussed (Graph. 3). Experimental results clearly show the rapid decrease in water losses of the plant at the time when maturity approaches.

A similar study was undertaken on the ears (Graph. 2, Fig. A). Maximum transpiration activity of ears occurs at the time when the total water-content of grains at the stage of their « water limit » remains constant (Graph 2, Fig. B) ; this coincides with the greater susceptibility of some wheat varieties to shrivelling during the stage when the water limit is reached.

ZUSAMMENFASSUNG

TRANSPIRATION UND REIFUNG DES WEIZENS IM MEDITERRANEN LANGUEDOC

In Vegetationsgefässen ausgeführte Versuche wurde die tägliche Transpiration des Weizens (Sorte *Ariana 8*) in abhängigkeit der potentiellen Evapotranspirationsbedingungen (PET) während der Reifephase unter dem Klima von Montpellier untersucht. Die Wasserversorgung wurde während des Tages durch häufige Wassergaben erhalten.

Um die potentielle Evapotranspiration zu charakterisieren, benutzte man die in der Hütte, mit dem Evaporometer von Piche gemessene Evaporation. Das gemessene, durch die Methode BOUCHET verbesserte Ergebnis, führt zu einem Wert *Ec* der evaporierenden Kraft, der als Test der Bedingungen der täglichen PET genommen wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass zuerst eine Korrelation zwischen den transpirierten Mengen Wassers und den Werten *Ec* (Abb. 1) besteht. Sobald jedoch die Verdunstungskraft zunimmt ($Ec > 20$ mm) nimmt die Transpiration viel langsamer in Abhängikeit von *Ec* zu. Die repräsentative Kurve geht in eine Ebene über, die die für die Kultur ökologisch ungünstigen Bedingungen anzeigt. Solche, für die Gegend typischen Tage entsprechen einer starken Luftturbulenz oder auch hohen Temperaturen.

Der Einfluss des Evolutionsstadiums der Pflanze während der Reifung auf die transpiratorische Tätigkeit wird ebenfalls näher bestimmt. (Abb. 3) Die Experimentalergebnisse unterstreichen das rasche Abnehmen der verlorenen Wassermenge durch die Kultur, wenn diese sich der Reife nähert.

Eine gleichartige Studie wurde für die Aehren unternommen. Die transpiratorische Tätigkeit

hat eine Maximalwerte in der Zeit, in der die totale in den Körnern enthaltene Wassermenge während der kurvenebene des Wassers innerhalb der Körner konstant bleibt. (Abb. 2, Fig. B) Diese Tatsache kann mit der grösseren Empfindlichkeit gegenüber Kornschrumpfung gewisser Sorten während der Phase der Kurvenebene verglichen werden.

РЕЗЮМЭ

Транспирация и созревание пшеницы в условиях средиземноморского Лангедока.

М. ГОДАР.

При помощи опытов проведенных в вегетационных вазах, автор изучил дневную транспирацию пшеницы (сорт Ариана 8) в течении фазы созревания в климатических условиях Монпелье, в зависимости от условий потенциальной эвапотранспирации (ETP). Снабжение растений влагой обезпечивалось частыми поливками в течении дня.

Испарение под метеорологическим прикрытием, определенное при помощи эвапорометра Пиша, послужило для охарактеризования ETP. Эта данная, исправленная по методу Р. Бушэ, приводит к величине Ec — испаряемости, которая и была принята как проба для условий суточной ETP.

Полученные результаты показали прежде всего существование корреляции между количеством влаги выделенным транспирацией и величинами Ec (Рис. 1). Но в случаях повышения испаряемости (Ec > 20 мм), увеличение транспирации протекает более медленно по отношению к Ec. Полученная кривая имеет тенденцию к образованию ступени, отмечая таким образом неблагоприятные для культуры экологические условия. Дни такого порядка характерны для этого района и соотвтствуют сильной турбулентности атмосферы или высоким температурам.

Уточнено было также влияние степени эволюции растений в период созревания на их транспирационную активность (Рис. 3). Экспериментальные результаты отметили быстрое уменьшение количеств влаги потерянных культурой приближающейся к полной зрелости.

Аналогичным образом изучались колосья (Рис. 2, А). Их транспирационная активность соответствует максимальным величинам в эпоху, когда общее количество влаги содержащееся зерном, застывает на постоянном уровне в фазе «платформы влажности» зерна (Рис. 2, Б). Этот факт может быть поставлен в параллель с большей чувствительностью некоторых сортов пшеницы по отношению к захвату в течении фазы « платформы ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1960 *a*. Évapotranspiration potentielle et évaporation sous abri. *VIe Journ. Hydraul.* **11**, n° 2. *Soc. Hydrotechn. France*, Nancy, 169-174.

BOUCHET R. J., 1960 *b*. Évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal. Sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1231-1233.

GESLIN H., JONARD P., 1946. Maturité du Blé et climat. Courbes caractéristiques du développement du grain de Blé au point de vue physique. *C. R. Acad. Agr.*, **32**, 165-170.

GESLIN H., JONARD P., 1948. Maturation du blé et climat. Contribution à l'étude du problème de l'échaudage. *Journ. sci. Pain, C. N. R. S.*, 111-122.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 849-857

INFLUENCE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE, HUMIFIÉE OU NON, SUR L'ÉVAPORATION

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SOUS CLIMAT MÉDITERRANÉEN (1)

G. CHARLES

avec la collaboration technique de M. L. ZAMMIT

Laboratoire de Science du Sol et de Bioclimatologie agricole,
E. N. S. A. Alger, I. N. R. A. Algérie

SOMMAIRE

Des essais effectués en pots, du 26 avril au 15 septembre 1962, ont montré que les pertes en eau du sol par évaporation sont favorisées par : les chaumes et les racines restés en place après la moisson, par « effet de mèche » ; l'enfouissement de paille, l'évaporation étant plus importante pour de faibles quantités (305 kg/ha), et pour la paille longue plus que pour celle hachée et broyée ; l'enfouissement de fumier, le fumier pailleux agissant davantage que celui bien décomposé.

INTRODUCTION

Dans les régions arides ou semi-arides chaudes où le facteur limitant fondamental de la production agricole est le déficit d'approvisionnement en eau des plantes, au moment où celles-ci en ont le plus besoin, il est essentiel, partout où l'irrigation n'est pas réalisée, de conserver l'humidité du sol, afin de mettre le maximum d'eau à la disposition des cultures. Aussi, les perfectionnements des méthodes culturales susceptibles de réduire l'évapotranspiration et d'accroître les apports secondaires d'humidité dans les sols, présentent-ils une importance toute particulière

(1) Note présentée au 82e Congrès de l'Association française pour l'Avancement des Sciences, Rennes, juillet 1963.

Dans la zone méditerranéenne, où l'incorporation aux sols de matière organique présente un intérêt considérable pour le maintien et l'amélioration de la fertilité, il convient de savoir quelle peut être l'influence d'une telle pratique sur le bilan de l'eau, et en particulier sur l'évapotranspiration. Sous ce climat, des observations paraissent montrer l'action de la matière organique plus ou moins humifiée, sur la dessiccation du sol. En particulier :

— après les récoltes des fourrages et des céréales, la dessiccation du sol est plus rapide que sur un sol nu. Des mesures nous ont montré que l'épaisseur de sol affecté par cette dessiccation est plus ou moins grande selon la texture, la structure, la nature du sous-sol et l'exposition ;

— dans les parcelles où ont été enfouies des pailles, on note une baisse du taux de l'humidité dans la couche supérieure du profil, nettement supérieure à celle enregistrée dans les sols où cette opération n'a pas été réalisée. On peut donc se demander si l'effet dépressif fréquemment constaté sur la végétation à la suite d'enfouissement des pailles, n'est pas en relation, dans cette région, en plus d'un déficit d'azote, avec cette action desséchante. L'enfouissement des pailles et l'utilisation croissante des moissonneuses-batteuses pourraient donc poser un problème particulier dans les régions céréalières de cette zone ;

— depuis longtemps, les agriculteurs du secteur traditionnel ont remarqué que l'enfouissement de fumier pailleux accentue, en année de déficit pluviométrique, et surtout dans les sols légers, les effets de la sécheresse. Aussi prétendent-ils que le fumier « brûle » les cultures de céréales et n'accordent-ils pas toujours tout l'intérêt qui convient à l'utilisation de cette source d'humus qu'ils négligent le plus souvent.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET CONDUITE DES ESSAIS

Dix kilos de terre fine de type « terre rouge des Cinq-Maisons » (Maison-Carrée) (tableau 1), sont placés dans chaque pot de végétation en zinc de 25 centimètres de diamètre et 25 centimètres de hauteur, sur le fond duquel a préalablement été déposé un petit tas de gravier siliceux, pour permettre une alimentation en eau à la base, à l'aide d'un tube coudé.

TABLEAU I

Caractéristiques du sol

Terre fine (%)	Granulométrie p. 100				Carbonates terreux (%)	Matière organique	pH
	Sables		Limon	Argile			
	Grossiers	Fins					
99,8	35,7	23,7	11,1	26,8	0,9	1,6	7,3

Trois types d'essais, comportant trois pots par traitement, ont pour objectif l'étude de l'action sur l'évapotranspiration de :

— l'enracinement des végétaux herbacés morts,
— l'enfouissement des pailles,
— l'enfouissement des fumiers.

Pour l'étude de l'action de l'enracinement des végétaux herbacés morts, le 16 janvier 1962, trois pieds d'orge sont repiqués dans trois pots, et, dans trois autres, six pieds. Les besoins en eau des plantes sont assurés par l'apport d'eau dans le tube coudé, et le maintien d'une humidité constante dans tous les pots. La récolte est effectuée le 1er juin en coupant les tiges 5 centimètre au-dessus du niveau du sol.

Dans l'étude de l'action de l'enfouissement des pailles, l'incorporation est faite en mélangeant avec la terre sur 10 centimètres d'épaisseur du sol (profondeur moyenne d'un labour de déchaumage), de la paille longue dans un groupe d'essais, et de la paille hachée et broyée dans un autre groupe. Pour chaque état de la paille, les quantités enfouies sont de 1,5 g, correspondant à 305 kg/ha (quantité minimum de paille laissée par une récolte faite à la moissonneuse-batteuse en Algérie), et 10 g correspondant à 2 033 kg/ha.

L'étude de l'action du fumier porte sur l'incorporation, en mélange avec la terre sur 15 cm d'épaisseur, de fumier pailleux dans un groupe d'essais, et de terreau dans un autre. Les doses utilisées sont par pot de : 150 g, correspondant à 30 tonnes à l'hectare, et 300 g, correspondant à 60 tonnes à l'hectare.

Durant la période de mesures, du 26 avril au 10 août, et pour tous les pots, l'humidité du sol est maintenue constante à un faible taux, voisin du point de flétrissement, et égale à 10 p. 100 en poids par remplacement de l'eau évaporée après la pesée à 17 heures. Les pertes en eau n'ont pas été compensées durant la période du 10 août au 15 septembre.

Il faut souligner que cette expérimentation a été conduite dans des conditions particulièrement difficiles en raison des événements qui se sont déroulés en Algérie à cette époque, ce qui a provoqué certaines perturbations, et fait qu'une partie seulement du programme de recherche a pu être réalisé.

RÉSULTATS

I. — Action après la récolte, de l'enracinement des végétaux herbacés morts sur l'évaporation

L'action de la densité du semis sur les pertes en eau du sol (tableau 2) montre bien l'influence qu'ont, sur ces dernières, les chaumes et les racines restés en place, quelle que soit l'humidité du sol.

L'évaporation est accentuée par le taux d'humidité du sol, sans que l'on puisse, dans l'expérimentation entreprise, établir la part qui revient respectivement au sol et aux chaumes et racines.

Ces résultats ne peuvent être comparés à ceux obtenus avec de la terre fine, par suite des modifications de structure provoquées par l'humidité entretenue dans le milieu pendant la période de croissance de l'orge, et par la végétation.

Le mécanisme en cause peut être comparé à celui d'une mèche qui permet le mouvement ascensionnel de l'eau des couches du sol prospectées par les racines, et son évaporation dans l'air atmosphérique au niveau du sol par les chaumes. Cette action est mise en évidence par l'expérience suivante :

On prend deux vases semblables contenant le même volume d'eau. Dans l'un, on place quelques pieds desséchés de céréales, de manière que les racines plongent dans l'eau et on abandonne à l'air. Au bout de quelques jours, on remarque que les racines ont favorisé l'évaporation de l'eau contenue dans le vase où ont été placés les appareils souterrains des végétaux.

TABLEAU 2

Action sur l'évaporation, des chaumes et des racines d'Orge restés en place après la moisson

Poids d'eau (en g) évaporée en moyenne par pot				Différence entre (*b*) et (*a*)	Différence en + % de (*b*) par rapport à (*a*)
Du	Au	Nombre de pieds par pot			
		3 (*a*)	6 (*b*)		
A. — *Poids d'eau évaporée lorsque l'humidité est maintenue constante*					
24 juillet 8 h	24 juillet 17 h	19,5	22,5	+ 3,0	
25 juillet 8 h	25 juillet 17 h	14,0	16,5	+ 2,5	
26 juillet 8 h	26 juillet 17 h	13,0	15,0	+ 2,0	
27 juillet 8 h	27 juillet 17 h	10,0	14,0	+ 4,0	
27 juillet 17 h	30 juillet 17 h	53,0	61,0	+ 8,0	
30 juillet 17 h	6 août 17 h	130,0	153,0	+ 23,0	
6 août 17 h	10 août 17 h	78,0	88,0	+ 10,0	
		317,5	370,0	+ 52,5	16,53
B. — *Poids d'eau évaporée lorsque l'humidité initiale n'est pas maintenue*					
10 août	15 septembre	514,0	588,0	+ 64,0	12,45

Cette action « d'effet de mèche de l'enracinement de végétaux herbacés morts », non seulement accentue dans les régions sèches le déficit en eau du sol, mais aussi altère les phénomènes biotiques et les transformations chimiques dont il est le siège. Elle réduit donc la fertilité des sols.

II. — Action de l'enfouissement des pailles

1°) *L'humidité du sol est maintenue constante* (10 *p.* 100)

Quel que soit l'état de la paille, l'évaporation du sol est accrue (tableau 3 A).

L'état de la paille joue un rôle important. C'est ainsi que la paille longue, quelle que soit la quantité enfouie, accentue davantage la perte en eau que la paille hachée et broyée. Pour la paille longue, la différence en plus pour 100, de la quantité d'eau évaporée par les pots traités par rapport au témoin, est en moyenne, durant la période du 25 avril au 10 août, près de deux fois plus élevée que pour la paille hachée et broyée.

Cette action paraît être liée à un effet de mèche comparable à celui dont nous avons précédemment souligné l'existence. La paille longue draine vers la surface du sol davantage l'humidité des couches plus profondes que la paille hachée et broyée.

La quantité de paille enfouie influence également l'évaporation du sol. La valeur la plus élevée de l'évaporation est obtenue lorsqu'on incorpore au sol une petite quantité (305 kg/ha) de paille longue, et d'une manière moindre de la paille hachée et broyée. L'augmentation de la quantité de paille enfouie (2 033 kg/ha) réduit les pertes en eau.

Les observations que nous avons effectuées paraissent montrer que de fortes quantités de paille incorporées au sol favorisent l'accumulation nocturne d'eau grâce aux apports secondaires d'humidité. Ce gain en eau est favorisé : par la grande facilité de circulation de l'air dans le sol ainsi mulché qui aide les processus de fixation, les propriétés hygroscopiques de la paille, et la facilité de diffusion de l'eau fixée par cette dernière dans les particules de sol environnant. Les difficultés inhérentes à la situation que nous avons évoquée, ne nous ont pas permis d'utiliser, avec des garanties suffisantes, le dispositif réalisé pour cette étude.

2°) *L'humidité du sol n'est pas maintenue constante*

L'évaporation est également dans ce cas, influencée par l'état de la paille incorporée au sol (tableau 3 B).

Lorsque le sol s'assèche progressivement, elle est aussi sous la dépendance de la quantité de paille enfouie. Une petite quantité de paille (305 kg/ha), quel que soit son état, accentue l'évaporation de la terre fine dans laquelle elle est incorporée. Dans ce cas c'est encore pour la paille longue que se manifeste la perte en eau la plus élevée. Par contre, l'enfouissement d'une quantité importante de paille (2 033 kg/ha) réduit l'évaporation du sol, la réduction est légèrement accentuée dans le cas de paille longue.

3°) *Influence des conditions climatiques lorsque l'humidité du sol est maintenue constante*

Lorsque l'humidité du sol est maintenue à une valeur voisine du point de flétrissement permanent (10 p. 100), l'enfouissement des pailles favorise l'évaporation aussi bien au printemps qu'en été. Cependant la différence pour 100 par rapport à la terre fine (tableau 3 C) montre que la perte en eau varie pour ces deux saisons avec l'état de la paille et la quantité incorporée.

III. — Action de l'enfouissement du fumier

1°) *L'humidité du sol est maintenue constante*

L'enfouissement de fumier quel que soit son état, augmente très sensiblement les pertes d'eau du sol par évaporation (tableau 3 A). Son état, la quantité incorporée, l'époque d'application influencent le phénomène.

L'enfouissement de fumier pailleux favorise davantage l'évaporation que celui de fumier bien décomposé. On constate que, lorsque la quantité de fumier pailleux incorporé au sol passe de 30 tonnes/hectare à 60 tonnes/hectare, la différence de perte d'eau par rapport au témoin est presque doublée. Pour le fumier bien décomposé, le rapport est sensiblement le même.

TABLEAU 3

Évaporation moyenne des pots de terre fine, et ayant reçu de la paille et du fumier

	Terre fine (en g) (témoin)	Paille par pot (en g)				Fumier par pot (en g)			
		Longue		Hachée-Broyée		Pailleux		Bien décomposé	
		1,5	10	1,5	10	150	300	150	300
A. Pour 48 jours au cours de la période du 26 avril au 10 août 1962. L'humidité est maintenue constante au voisinage du point de flétrissement permanent (soit 10 %) .	480,0	521,5	496,5	504,0	488,5	589,5	670,5	515,5	546,0
— Différence par rapport à la terre fine.....		+ 41,5	+ 16,5	+ 24,0	+ 8,5	+ 109,5	+ 190,5	+ 35,5	+ 66,0
— Différence % par rapport à la terre fine		+ 8,6	+ 3,4	+ 5,0	+ 1,8	+ 22,8	+ 39,7	+ 7,4	+ 13,7
B. Pour la période du 10 août au 15 septembre. L'humidité initiale n'est pas maintenue...	294,5	315,0	289,0	297,5	291,0	349,0	405,0	295,0	315,0
— Différence par rapport à la terre fine.....		+ 20,6	— 5,5	+ 3,0	— 3,5	+ 54,5	+ 110,5	+ 0,5	+ 20,5
— Différence % par rapport à la terre fine		+ 6,9	— 1,8	+ 1,0	— 1,2	+ 18,5	+ 37,5	+ 0,1	+ 7,0
C. Influence de la saison lorsque l'humidité est maintenue constante au voisinage du point de flétrissement permament :									
1. Printemps. Pour 30 jours au cours de la période du 26 avril au 25 mai 1962.....	306,5	332,0	313,0	317,5	308,0	378,5	431,5	331,0	352,5
— Différence par rapport à la terre fine.....		+ 26,5	+ 6,5	+ 11,0	+ 1,5	+ 72,0	+ 125,0	+ 24,5	+ 46,0
— Différence % par rapport à la terre fine		+ 8,6	+ 2,1	+ 3,6	+ 0,5	+ 23,5	+ 40,8	+ 8,0	+ 14,7
2. Été. Pour 18 jours de la période du 23 juillet au 10 août 1962	173,5	189,5	183,5	186,5	180,5	211,0	239,0	184,5	193,5
— Différence par rapport à la terre fine.....		+ 16,0	+ 10,0	+ 13,0	+ 7,0	+ 37,5	+ 65,5	+ 11,0	+ 20,5
— Différence % par rapport à la terre fine		+ 9,2	+ 5,8	+ 7,5	+ 4,0	+ 21,6	+ 37,7	+ 6,3	+ 11,0

Si un effet de mèche peut être encore évoqué, il semble que, dans le cas du fumier, la migration de l'eau soit favorisée par la gaine de matière plus ou moins humifiée qui entoure les débris végétaux. D'où une accentuation des phénomènes d'évaporation par rapport à ceux constatés dans le cas d'incorporation de paille au sol.

2°) *L'humidité du sol n'est pas maintenue constante*

Dans ce cas (tableau 3 B), l'enfouissement de fumier pailleux et de fumier bien décomposé, a, sur l'évaporation du sol, une action générale assez voisine de celle qui a été soulignée. Cependant, du fait de la réduction progressive des ressources en eau du sol, la différence pour 100 de perte en eau par rapport à la terre fine est moins élevée que précédemment.

3°) *Influence des conditions climatiques lorsque l'humidité du sol est maintenue constante*

Les différences pour 100 par rapport au témoin (tableau 3 C) montrent que durant l'été (période du 23 juillet au 10 août), les pertes par évaporation sont inférieures à celles enregistrées au printemps (période du 26 avril au 25 mai). Ceci paraît être dû au fait qu'il y a transformation progressive en humus, de la matière organique apportée.

CONCLUSION

Dans les conditions expérimentales réalisées, les résultats obtenus soulignent les très faibles valeurs de l'évaporation. Pour 48 journées, au cours de la période du 26 avril au 10 août, la terre fine évapore : 9,7 mm, l'enfouissement de 305 kg/ha de paille longue : 10,6 mm, l'enfouissement de 60 tonnes/ha de fumier pailleux : 13,6 mm. Les facteurs responsables sont : la faible humidité du sol qui est voisine du point de flétrissement et la structure. Une expérimentation antérieure nous a en effet montré, en ce qui concerne la structure, que l'évaporation du sol est minimale dans le cas de terre fine, alors que le même sol en place, finement pulvérisé ou en mottes de 1 cm, évapore bien plus. Il faut également mentionner les conditions particulières dans lesquelles se trouve le sol. Dans le sol en place, il y a ascension de l'eau vers la surface, à partir des horizons sous-jacents où se situent ses ressources. D'où une évaporation plus importante.

On a ainsi mis en évidence le fait que, même dans les conditions les plus défavorables, les racines de graminées et les chaumes restés en place après la récolte, l'enfouissement de fumier et de paille, accentuent les pertes en eau du sol.

Cette expérimentation permet de tirer un certain nombre de renseignements agronomiques applicables aux sols cultivés, non irrigués, des régions où la lutte contre les pertes en eau du sol par évaporation constitue une précocupation essentielle. En particulier, elle met en évidence l'intérêt de certaines pratiques :

— pour réduire les pertes en eau du sol par effet de mèche, il paraît nécessaire d'effectuer un labour de déchaumage le plus rapidement possible après la récolte de céréales ou des fourrages ;

— dans les régions céréalières la fabrication de fumier artificiel et son enfouissement à l'état fait, tôt à l'automne, paraît être préférable au point de vue technique, à l'enfouissement des pailles derrière la moissonneuse-batteuse qui se développe dans les exploitations mécanisées ;

— enfin, l'enfouissement de fumier pailleux est à déconseiller. Il convient plutôt d'enfouir à l'automne un fumier bien décomposé, de façon que les débris organiques incomplètement transformés s'humifient au cours de la période humide et ne soient plus en état d'accélérer l'évaporation du sol, lorsque la période des pluies a cessé.

Reçu pour publication en juin 1963.

SUMMARY

The effect of humified and non-humified organic matter on evaporation. An experimental study under conditions of a mediterranean climate

Three types of pot experiments in zinc containers of 25 cm diameter and 25 cm height were undertaken with a view to establishing the effect of dead roots of herbaceous plants after the harvest, turning down of 305 kg and 2 033 kg/ha long or cut straw, and incorporation of 30 tons and 60 tons/ha undecomposed or well-decomposed manure on the evaporation from fine soil.

From the 26 April to 10 August 1962, soil moisture was maintained near wilting point (10 p. 100 by weight) ; from the August to 15 September, the water losses were not made up.

The stubble and roots remaining after the harvest of barley increased evaporation. The mechanism involved is comparable to the effect of a wick promoting the upward movement of moisture from the soil layers penetrated by the roots, followed by the evaporation of water from the soil surface into the atmosphere by way of the stubble. A dense stand increases the water loss.

Turning down of small amounts of straw (305 kg/ha) promote evapotranspiration under all conditions of soil moisture, and long straw has the most marked effect. Incorporation of large amounts of straw (2 033 kg/ha) reduces water losses ; in this case, evaporation is less than that from fine soil if the initial moisture level is not maintained.

Incorporation of manure markedly increases moisture losses by evaporation from the soil ; undecomposed manure has a greater effect than well-decomposed one, and moisture losses increase with the amount of manure incorporated.

ZUSAMMENFASSUNG

Einfluss humifizierter oder nicht humifizierter organischer Masse auf die Evaporation. Experimentalstudie unter Mittelmeerklima

Ziel drei verschiedener Versuche in Zinkgefässen von 25 cm Durchmesser und 25 cm Höhe war das Studium der Wirkung auf die Evaporation aus Feinerde von Wurzelrückständen krautiger Pflanzen, das unterbringen von 305 Kg/Ha und 2 33 Kg/Ha langem, gequetschtem und gehäckseltem Stroh, das Unterbringen von 30 T/Ha und 60 T/Ha strohigem, gut zersetztem Mist.

Während der Zeit vom 26 April bis 10. August 1962 wurde die Bodenfeuchtigkeit konstant um den Welkepunkt gehalten (10 p. 100 des Gewichts). Vom 10. August bis 15. September wurden die Wasserverluste nicht ersetzt.

Nach der Ernte beschleunigen die verbliebenen Gerstenhalme und -wurzeln die Evaporation. Der Mechanismus kann demjenigen eines Dochts verglichen werden, der die Aufwärtsbewegung des Wassers aus dem mit Wurzeln durchsetzten Boden fördert, und dann die Evaporation in die Luft durch die Halme. Die Saatdichte erhöht die Wasserverluste.

Das Einbringen geringer Mengen Strohes (305 Kg/Ha) begünstigt die Evapotranspiration, welches auch der Zustand une die Feuchtigkeit des Bodens sein mögen. In diesem Falle ist es jedoch das Langstroh, das die Wasserverluste fördert. Das Einbringen grosser Mengen Strohes (2033 Kg/Ha) verringert die Wasserverluste. Für grosse Mangen Strohes ist, sofern die ursprüngliche Feuchtikgeit des Bodens nicht erhalten bleibt, die Evaporation geringer als diejenige der Feinerde.

Das Unterbringen von Stallmist zieht empfindliche Wasserverluste durch Evaporation nach sich. Strohiger Mist wirkt besser luste als gut zersetzter. Die Wasserverluste steigen mit der eingebrachten Menge Mistes.

РЕЗЮМЭ

Влияние гуммифицированного или не гуммифицированного органического вещества на испарение.

Экспериментальное изучение в условиях Средиземноморского климата.

ШАРЛЬ.

Три серии опытов были заложены автором в вегетационных цинковых сосудах 25-ти см. диаметра и 25-ти см. высоты. Автор поставил себе задачей изучить действие на испарение просеянной почвы : 1. Погибших после сбора урожая корневых систем трав; 2. Заделанной в почву длинностебельной (305 кг./га) и рубленной, искрошенной (2.033 кг./га) соломы; 3. Заделанного в почву навоза соломистого (30 тонн/га) или хорошо разложившегося (60 тонн/га).

В период от 26-го Апреля до 10-го Августа влажность почвы постоянно поддерживалась по соседству с точкой увядания (10 % веса). В период от 10-го Августа и до 15-го Сентября — расход влаги не возмещался.

Солома и корневые системы ячменя оставшиеся на месте после жатвы, увеличивают испарение. Механизм этого явления, облегчающего подачу влаги из слоев почвы занятых корнями и ее испарение соломой на уровне почвы, можно сравнить с действием фитиля. Плотность посева увеличивает потери влаги.

Небольшие количества (305 кг./га) заделанной соломы облегчают эвапотранспирацию, вне зависимости от степени влажности данной почвы. Солома длинностебельная наиболее способствует увеличению потери влаги, в данном случае. Внесение в почву более крупных количеств соломы, уменьшает расход влаги. Но испарение будет менее сильным, при заделывании крупных количеств соломы, в тех случаях, когда исходная влажность почвы — не сохраняется.

Внесение навоза в почву увеличивает потери влаги от испарения. Соломистый навоз действует более активно чем навоз хорошо разложившийся. Потери влаги увеличиваются пропорционально колчествам внесенного навоза.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DAMAGNEZ J., 1958. Les propriétés hygroscopiques des sols et les apports secondaires d'humidité. Importance du mulch naturel. *Ann. agron.*, **9**, 661-678.

HALLAIRE M., 1957. Diffusion de l'eau à l'état vapeur et liquide au voisinage de la surface d'évaporation et desséchement superficiel du sol. *U. G. G. Assoc. Intern. Hydrol. Scient. Ass. gén. Toronto*, **2**, 446-480.

HENIN S., MONNIER G., 1961. Mécanisme de l'action d'une couverture sur le bilan de l'eau du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **252**, 939-941.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 859-872

L'UTILISATION DES EAUX SALÉES AU SAHARA (1)

P. SIMONNEAU et G. AUBERT

Service des Études scientifiques appliquées à l'Hydraulique, Alger;
Section de Pédologie, O.R.S.T.O.M (France)

SOMMAIRE

Après avoir indiqué les conditions de milieu, dans les stations expérimentales du Sahara algérien et du Sud tunisien où ils ont eu la possibilité d'observer le développement de cultures irriguées avec des eaux fortement minéralisées (1,5 à 7 g par litre), les auteurs donnent des listes de plantes cultivées, en fonction de leur résistance au salant : cultures maraîchères, arbres fruitiers, essences forestières, cultures industrielles, fourragères et céréalières. Ils donnent aussi des indications sur la pratique des irrigations en pareil cas.

INTRODUCTION

Les eaux profondes utilisées au Sahara pour la pratique des irrigations, qu'elles soient artésiennes ou proviennent de pompage, sont presque toujours fortement minéralisées.

En effet, le degré de salure de la nappe phréatique varie de : 6 à 7 g par litre dans l'Oued R'hir ; 2,5 à 6 g par litre dans le Saoura ; 1,2 à 2,5 g par litre dans la nappe de l'Albien, au Sahara (SIMONNEAU, 1961) ; dans le Sud Tunisien il atteint 4,7 g à Ksar Khilane, 6,2 g à Zarzis et 3 g à 4,5 g à Gabès (BUREAU, COINTEPAS, RŒDERER et GILBERT, 1959 ; COINTEPAS, 1960).

Dans les foggaras, canaux souterrains creusés pour permettre de recueillir les eaux de nappes circulantes, assez peu profondes, et, le plus souvent, de faible épaisseur et de faible étendue, du Sahara Central (Touat, Tidikelt, Gourara), la salinité des eaux, beaucoup moins élevée, ne dépasse qu'exceptionnellement 2 g par litre.

(1) Ce travail a été présenté au Symposium organisé à Tashkent (Ouzbékistan) avec la collaboration de l'UNESCO par les Académies des Sciences d'URSS et d'Ouzbékistan, du 6 au 12 août 1962, sur l'utilisation des eaux et des terrains salés en culture irriguée.

Ces eaux sont fortement sodiques, la proportion de Na par rapport à la somme des cations variant de 44 p. 100 à Gabès à 65 p. 100 à Igli et 77,5 p. 100 à Zarzis. (BUREAU et *al.*, 1959 ; COINTEPAS, 1960 ; SIMONNEAU, 1961)

Elles sont employées sur des terrains sableux, sablo-limoneux, perméables et beaucoup plus rarement sur des sols argilo-limoneux ou argileux *(tinn)*, relativement imperméables.

La pauvreté de ces sols en éléments utiles aux cultures, et sous forme assimilable, est remarquable. Mais, avant la mise en valeur, leur salinité est relativement faible : elle résulte, le plus souvent, de l'accumulation des sels déposés pendant la saison sèche par les eaux phréatiques, qui remontent par capillarité.

La profondeur de la nappe phréatique varie très largement suivant les régions : 1 m à Zarzis et à Gabès ; 3 à 6 m à Igli et Adrar ; 2 m et même moins dans les anciennes oasis ; parfois 10 m dans les zones nouvellement mises en valeur (BUREAU et *al.*, 1959 ; SIMONNEAU, 1961).

L'intensité de ce phénomène est très grande car ces terrains sont soumis à un climat désertique sec et chaud.

En effet, pour DE MARTONNE et AUFRÈRE, ils se trouvent localisés dans les déserts chauds, à pluviométrie mal répartie et à température hivernale élevée. Ils peuvent être :

— absolus, du type lybien, à pluie ne tombant pas tous les ans : Sahara central (Touat, Tidikelt, Gourara).

— atténués, à pluies saisonnières : Sahara septentrional.

La pluviométrie est toujours inférieure à 100 mm par an.

De plus, l'extrême irrégularité des précipitations aggrave encore l'aridité ; l'évaporation, favorisée par la sécheresse de l'air, par la chaleur et par la fréquence des vents atteint des valeurs importantes, qui, mesurées au Piche, varient de 2 m à plus de 5 m par an :

Colomb-Béchar : 2 m ; El-Oued : 3 m ; El-Goléa 3,30 m ; In-Salah : 5,20 m.

Il s'ensuit que l'utilisation de l'eau salée pour l'irrigation des cultures doit toujours être réalisée avec une grande prudence car la moindre erreur (distribution défectueuse, façons culturales non appropriées, etc...) peut provoquer des phénomènes de salinisation secondaire.

Ainsi à Adrar les zones de sols touchées par ce processus atteignent 4 et 5 p. 1 000 de NaCl alors qu'initialement leur teneur en ce sel ne dépassait pas 1,2 à 2 p. 1 000.

A Ksar Khilane, le sol, finement sableux, avec quelques lits argileux (SIMONNEAU, 1961) très peu épais, et pratiquement non salé au début de sa mise en valeur, s'est peu à peu enrichi en sels (eau d'irrigation contenant 4,7 g de sels par litre, dont 2,5 g de NaCl), la conductivité de l'extrait de pâte saturé (C E) des couches sableuses atteignant 3,5 à 4 millimhos/cm ; celle des couches argileuses 12 millimhos/cm.

Les taches salées saisonnières dans lesquelles, souvent, le sel est recouvert d'efflorescences (Igli) ou de croûtes salines cristallisées (Adrar) sont fréquentes. Mais elles sont facilement éliminées en raison de la grande perméabilité des terrains (COINTEPAS, 1960) et, lorsque les terres sont moins perméables, par l'apport d'amendement constitué par du sable d'erg.

A Ksar Khilane (COINTREPAS, 1960), par places, à certaines périodes, la salure est telle en surface, que la couche de terre y devient poudreuse, la C E atteignant

42 millimhos/cm. Mais, le lessivage par l'eau d'irrigation rabaisse rapidement ce chiffre à des valeurs 3,5-4 millimhos/cm.

Il est même possible, en utilisant des eaux assez minéralisées, de diminuer la salure initiale d'horizons supérieurs de sols salés mais perméables. A Gabès, en rizière expérimentale, en une saison d'irrigation avec de l'eau titrant 4,5 g/l de résidu sec, la salure des couches superficielles est passée de 24 p. 1 000 de chlorures totaux (Cl exprimé en NaCl) à 1 p. 1 000 et des couches profondes de 8 p. 1 000 à 1,5 p. 1 000.

Le salant peut cependant se maintenir et même s'étendre à la suite d'irrigations mal conduites et le phénomène est alors difficile à combattre malgré la bonne perméabilité des sols infestés.

La mise en valeur des sols sahariens par l'arrosage avec des eaux fortement minéralisées doit donc tenir compte de ces conditions particulières du milieu. Elle a été étudiée dans les Centres d'Études d'irrigation d'Igli et d'Adrar en Algérie depuis leur création en 1954 (SIMONNEAU, 1961). D'autre planches expérimentales ont aussi été mises en œuvre en Tunisie : Ksar Rhilane, en bordure de l'Erg Oriental, et Gabès en zone subdésertique, mais en sol très gypseux (COINTEPAS, 1960 ; COINTEPAS, NOVIKOFF et DAMAGNEZ, 1960)

OBSERVATION SUR LA TOLÉRANCE AUX SELS DES PLANTES CULTIVÉES

Il faut d'abord rappeler que, sur les plantes spontanées ou cultivées, la salanité a deux actions bien distinctes, qui peuvent très souvent se produire simultanément :

1) *l'intoxication par les sels*, qui provoque la décoloration (chlorose) : les végétaux ne parviennent pas à absorber les quantités d'eau qui leur sont nécessaires parce que les sels accumulés dans leurs tissus ont tendance à se substituer aux substances organiques qui jouent un rôle dans le phénomène d'osmose, le flétrissement prématuré de la plante.

2) *la sécheresse physiologique* (manque d'eau) qui détermine le rabougrissement ou la nanisation des sujets.

Contre les méfaits du salant, la défense des végétaux s'exprime par des différences d'aspect : le milieu halophile provoque une modification de la structure anatomique, principalement la succulence, tandis que la sécheresse favorise le développement de poils, d'épines et de sclérenchyme.

Lorsque la salanité augmente, les effets nocifs s'aggravent amenant : la diminution ou même la disparition de la fonction de reproduction ; l'absence de développement : dans les cas extrêmes, la graine germe et la plantule meurt dès que les réserves sont épuisées.

Les halophytes, dont la tolérance protoplasmique aux sels est très élevée, sont particulièrement bien adaptées. Elles peuvent : passer à l'état de vie ralentie au moment où les concentrations salines sont les plus fortes, régulariser la pression osmotique ; utiliser l'humidité aérienne (*Cressa cretica, Crithmum maritimum, Mesembryanthemum, Tamarix* etc.)

Elles ne sont pas liées, le plus souvent, à la présence d'un type particulier de

sel dans le sol. Il existe cependant des halophytes qui poussent spontanément dans les milieux salins, sulfatés, gypseux ou même carbonatés.

Malheureusement, les plantes habituellement cultivées ne sont pas aussi résistantes, leur tolérance protoplasmique aux sels étant beaucoup moins forte que celle des halophytes.

Une pression osmotique insuffisante ne leur permet pas de supporter une augmentation massive de la pression consécutive à perte d'eau par évaporation, qui équivaut à un accroissement de la concentraton saline interne. Le manque d'eau entrave alors l'absorption des matières nutritives. L'assimilation du gaz carbonique ne se fait plus : les plantes s'étiolent.

Ces phénomènes apparaissent pour des concentrations salines de la solution du sol variables suivant les espèces. Nos études ont porté sur différents groupes de plantes cultivées :

a) *Cultures maraîchères*

Les observations faites depuis 1954 dans les Centres d'Études d'Irrigation d'Igli et d'Adrar, tous deux installés sur des sols salins arrosés avec des eaux fortement minéralisées ont permis d'établir un classement des plantes maraîchères en fonction de leur tolérance aux concentrations salines des solutions du sol :

1) Plantes supportant mal les concentrations faibles comprises en moyenne entre 1 et 2 g de chlorure totaux par litre : Fraisier, Haricot.

2) Plantes ayant une tolérance moyenne, c'est-à-dire s'adaptant à des concentrations salines de 3 à 5 g de chlorures totaux par litre : Fève, Melon, Patate douce' Petits pois, Courgette, Courge, salade (Laitue — Chicorée — Romaine).

3) Plantes ayant une résistance élevée, supportant des concentrations salines comprises entre 6 et 8 g de chlorures totaux par litre : Aubergine, Artichaut, Carde, Chou, Chou-fleur, Carotte, Navet, Bette, Épinard, Piment, Poivron, Pomme de terre, Tomate, Maïs.

4) Plantes très résistantes au salant et tolérant, quoique assez mal, les concentrations salines variant de 9 à 11 g de chlorures totaux par litre : Asperge, Betterave rouge, Ail, Oignon, Radis, Poireau.

Lorsque la concentration saline des solutions du sol varie entre des teneurs en Cl correspondant à 6 et 9 g ClNa par litre, des maladies apparaissent sur les fruits des tomates, des piments et des poivrons.

Les aubergines peuvent aussi être atteintes. Enfin les tubercules de pomme de terre et les racines des patates douces et des betteraves sont alors toujours de très mauvaise conservation.

Des observations semblables ont été faites par V. Novikoff (1946) en Tunisie et par E. F. Eaton (1942) aux USA, qui explique que les maladies sont dues à la difficulté d'absorption de l'eau par la plante en milieu à forte concentration saline : le déficit hydrique provoquerait le retrait d'une certaine quantité d'eau des fruits, des tubercules et des feuilles, d'où flétrissement et pourriture des tissus pistillaires désorganisés.

Les concentrations salines indiquées ci-dessus n'ont évidemment rien d'absolu, car il est impossible de caractériser avec précision par un chiffre la résistance aux sels d'une plante dans des milieux aussi complexes et instables que les sols et les solutions qui y circulent.

FIG. 1. — *Vue générale du Centre d'Études d'Irrigation d'Igli (octobre* 1961)
Surface : 12 ha — Les haies protectrices, constituées par *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus sempervirens* et *Acacia farnesiana*, délimitent des parcelles de 25 ares. Les sols sont des alluvions sablo-limoneuses salées

FIG. 2. — *Igli : Culture de* Melilotus alba annua
Production : 300 q/ha en vert

FIG. 3. — *Igli : L'effeuillage des cultures d'artichaut* (Blanc d'Oran)
Des rendements supérieurs à 60 qx ha ont été obtenus en première année de culture et compris entre 120 et 140 qx ha en seconde et dernière année de culture

FIG. 4. — *Igli : Culture de Pavot d'Iran*

Il faut donc admettre avec E. F. EATON (1942) que « ... la limite de tolérance pour n'importe quelle plante semble être un concept insaisissable, car la mort s'achemine lentement dans une gamme de concentrations, et dans les jours particulièrement chauds, les plantes qui vivent sur des solutions salées peuvent mourir rapidement ».

b) *Arbres fruitiers*

Dans ce cas, les observations ont été effectuées dans les plantations des oasis, car les vergers, établis dans les Centres d'Études d'Irrigation, sont encore beaucoup trop jeunes, pour permettre de tirer des conclusions.

Au Sahara, il semble que les arbres fruitiers puissent être classés ainsi par ordre décroissant de tolérance aux sels : Palmier-dattier, Grenadier, Figuier, Olivier, Oranger, Citronnier.

En particulier, le palmier-dattier supporte des salures élevées, mais le rendement et la qualité des fruits — dans le cas de la variété *Deglet Nour* — diminuent déjà lorsqu'en terrain sableux il est irrigué avec des eaux à 5 g de résidu sec ; l'olivier est assez résistant (3 à 5 g de résidu sec dans la solution du sol en surface, et un peu plus en profondeur) ; l'oranger et le citronnier sont, au contraire très sensibles.

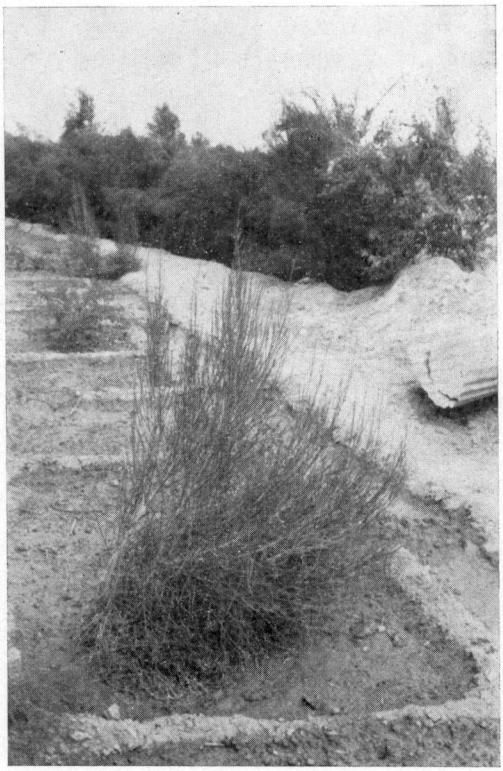


FIG. 5. — *Adrar* : Haxolylon aphyllum, *plant issu d'un semis effectué en mars (octobre 1961)*

c) *Essences forestières*

Aucune mesure précise n'a été réalisée jusqu'à maintenant.

Cependant, les observations, effectuées dans les oasis ont permis de classer ainsi par ordre décroissant de tolérance aux sels :

1°) Les espèces sahariennes suivantes : *Tamarix Balansae, Tamarix pauciovulata, Limoniastrum Ifniense, Nitraria retusa, Tamarix articulata, Tamarix gallica* ssp. *nilotica*.

Toutes ces essences, à l'état adulte, supportent, sur des sols sableux des eaux présentant une teneur en Cl correspondant à 10 g ClNa/litre.

2°) Les espèces introduites : *Haloxylon aphyllum, Eucalyptus occidentalis, Eleagnus angustifolius, Salsola Richteri, Parkinsonia aculeata*.

Expérimentées à Igli et à Adrar, ces essences ont germé et évolué normalement sur des sols salins sableux irrigués avec des eaux renfermant jusqu'à 7 g de chlorures par litre (Cl exprimé en NaCl).

d) *Cultures industrielles, fourragères et céréalières*

Observées dans les cultures locales et dans les Centres d'Études d'irrigation, elles ont été classées ainsi par ordre décroissant de tolérance aux sels : Mélilot (*Melilotus alba annua*), Luzerne (*Medicago sativa*), Cotonnier, Blé, Orge, Sorgho.

La luzerne de Demnat, originaire du sud marocain, est apparue comme plus résistante que la luzerne de Provence, dont le comportement est pourtant remarquable.

Le blé Ben Mabrouck, dont la sélection n'est pas terminée, s'est montré très tolérant (SIMONNEAU, 1962) et parfois plus que des cultures résistantes comme le cotonnier. Il en est de même pour certaines variétés d'orge comme celle de Gabès (BUREAU et *al.*, 1959).

Dans les cotonniers, *Gossypium hirsutum* s'est mieux comporté que *G. barbadense* (SIMONNEAU, 1961)

Cependant, la résistance des plantes aux sels n'est pas constante. Elle est beaucoup moins élevée pendant la période de germination. Nous avons pu effectuer diverses observations sur les plantes maraîchères :

1°) Toutes les semences germent dans les semis arrosés avec des eaux renfermant jusqu'à 7 g de chlorures par litre en fin d'été (20 août-30 septembre) à Igli et à Adrar.

Ce résultat confirme ceux obtenus par V. NOVIKOFF (1946) qui a démontré que la plupart des graines potagères germent dans des solutions à concentration saline élevée (10 à 12 g de chlorures par litre), très supérieure à celle des eaux salées utilisées au Sahara pour la pratique des irrigations.

2°) L'emploi d'eau fortement minéralisée pour irriguer par submersion les semis détermine toujours des retards variant de 2 à 6 jours dans la germination (Igli et Adrar).

Nous retrouvons là un fait précédemment mis en évidence, expérimentalement

par V. Novikoff (1946) qui a enregistré des retards de 4 à 10 jours lorsque la concentration saline était supérieure à 10 g par litre pour tous les chlorures (Na, Ca, Mg).

3°) Lorsque la salure est excessive, la levée est inférieure à 90 p. 100 et les plantes sont faibles et chétives. Si elles ne sont pas rapidement transplantées dans un milieu plus sain, elles ne tardent pas à dépérir et disparaître.

CONSIDÉRATIONS SUR LA PRATIQUE DES IRRIGATIONS

La pratique des irrigations avec des eaux salées (3 à 6 g par litre) en sols salins et sous climat désertique a permis de faire un certain nombre de constatations :

1°) Au point de vue technique de l'arrosage, elle a confirmé que :

a) l'utilisation des eaux fortement minéralisées n'est possible qu'en sols perméables, à sous-sols naturellement bien drainés (sableux à limono-sableux).

Dès que la perméabilité diminue, en terrains argileux (tinn) par exemple, les irrigations provoquent des phénomènes de salinisation secondaire, très intenses, qui, dans les cas étudiés, parviennent à se stabiliser, mais à un taux élevé, en deux ou trois campagnes d'arrosages.

En sols argileux, une richesse moyenne en gypse (< 30 p. 100 SO_4Ca, 2 H_2O) permet le maintient d'une meilleure perméabilité, et améliore ainsi les conditions culturales.

b) les arrosages doivent toujours être fréquents afin de régulariser la concentration saline des solutions du sol : 10 g de résidu sec par litre constitue à Igli la limite supérieure tolérée par les cultures maraîchères les plus résistantes (asperge, tomate, aubergine, piment, betterave rouge).

Le drainage naturel du sol doit presque toujours être amélioré par un drainage artificiel de façon à limiter la remontée de la nappe phréatique. Cette précaution est particulièrement difficile à réaliser lorsque l'abaissement de son niveau est freiné par un obstacle en aval : masse d'eau d'un chott, de la mer etc... Le maintien de la nappe à une certaine profondeur nécessite aussi d'éviter la déperdition des eaux dans les canaux d'irrigation.

c) les irrigations doivent être moins nombreuses et moins copieuses pendant la saison chaude (juin à septembre inclus) pour éviter l'augmentation des accumulations salines par évaporation. Cela impose :

— l'arrêt des cultures pendant l'été, particulièrement celles qui sont les plus exigeantes en eau : cultures maraîchères, cotonnier.

— l'organisation de la production en vue d'obtenir : soit des cultures précoces : les récoltes doivent être terminées au début de mai à Adrar ou de juin à Igli au moment où les efflorescences salines, parfois même des croûtes cristallines, commencent à se manifester à la surface du sol ; soit des cultures tardives : les semis, effectués de fin août à fin septembre, ont toujours donné les meilleurs résultats dans les deux aires d'irrigation.

d) les irrigations copieuses, données au début de l'hiver, favorisent le lessivage de l'horizon superficiel du sol ; les résidus de l'évaporation des eaux salées, très importants pendant l'été, sont entraînés ou dilués.

En outre, ces arrosages provoquent la diminution de la concentration saline des solutions du sol.

Comme PENET (1913) l'a bien montré, l'eau qui est répartie dans les palmeraies des oasis pendant les trois ou quatre premiers mois de l'hiver, sert davantage au lessivage des terres infestées par les sels qu'au développement de la végétation.

e) l'utilisation des eaux salées est toujours moins dangereuse en hiver en raison d'une intensité moindre de l'évaporation ; ce qui permet de lutter efficacement contre l'action néfaste des solutions salines.

f) Chaque fois que cela est possible, le degré de salure des eaux d'irrigation doit correspondre à celui de la solution du sol.

Entre deux arrosages, la concentration saline de la solution du sol augmente parfois considérablement. Pour se maintenir, le végétal doit réagir d'une façon semblable en augmentant la pression osmotique de la cellule. Suivant la rapidité d'adaptation aux nouvelles conditions ainsi créées, la plante ou bien parvient à équilibrer l'action du milieu et à suivre ou bien meurt.

D'ailleurs, les brusques variations du taux de salinité, même dans les solutions faiblement concentrées, sont toujours fatales pour les végétaux : lorsqu'une irrigation est donnée avec des eaux salées en période de chaleur, alors que le sol renferme encore de l'eau disponible, la végétation s'arrête et la plante se dessèche.

Pour les raisons exposées ci-dessus, les volumes utilisés pour les irrigations dans nos parcelles d'essais auraient dû augmenter au fur et à mesure que la salinité des eaux s'élevait. Il n'en a pas été ainsi car le développement des écrans végétaux, constitués par des cyprès et des *casuarinas*, délimitant les parcelles de 25 ares, a permis de réduire considérablement le débit permanent nécessaire à la mise en culture intensive.

Ainsi dans le Centre d'Étude des Irrigations d'Igli où des mesures précises ont été faites, les débits ont été de :

1,8 l/sec. en 1956-57 : année de la plantation des haies forestières protectrices,
1,6 l/sec. en 1957-58,
0,83 l/sec. en 1958-59,
0, 47l/sec. en 1959-60,
0,47 l/sec. en 1960-61.

Dans le Sud Tunisien des résultats analogues ont été obtenus, la limite inférieure restant à 0,4-0,5 l/sec.

2°) Au point de vue cultural, l'utilisation des eaux salées a conduit à adopter les techniques particulières suivantes jusqu'alors presque totalement inconnues au Sahara :

a) *la jachère.*

La jachère hivernale, ou à la rigueur les cultures d'engrais, verts, qui nécessitent peu d'irrigations, ont toujours un effet bienfaisant à condition de diminuer et, autant que possible, d'arrêter l'évaporation par capillarité dans les terrains par des façons culturales superficielles fréquentes.

b) *la protection végétale.*

L'évaporation doit être réduite par tous les moyens possibles : la plantation des haies protectrices joue un rôle très efficace dans la lutte contre les effets desséchants des vents.

De même, l'entretien de cultures superficielles, peu exigeantes en eau, peut avoir une action favorable.

c) *la culture sur billons.*

La culture sur billons, les plus gros possible, doit être adoptée chaque fois que cela se peut car elle permet d'arroser par infiltration, mode d'irrigation bien supérieur à celui généralement pratiqué dans les oasis sahariennes : la submersion du terrain aménagé en petites planches presque carrées.

La partie supérieure du billon constitue, s'il est assez large, un milieu relativement sain dans lequel des semences, qui sont beaucoup plus sensibles aux effets du salant pendant la période de germination évoluent plus facilement.

d) *l'utilisation de fumures abondantes.*

Les plantes, bien alimentées, sont plus résistantes aux sels.

Dans les terres irriguées du Sahara, qui sont toujours lessivées par ces irrigations elles-mêmes, il importe donc d'apporter une forte fumure : organique afin d'améliorer la structure des terrains (engrais verts et, encore mieux, s'il est possible, fumier), minérale, à base d'engrais chimiques ne contenant pas de chlorures. Elle doit être très riche en azote, cet élément faisant pratiquement défaut dans les sols sahariens.

CONCLUSION

Les observations et les expériences réalisées au Sahara depuis 1954 montrent que la résistance des plantes au salant est, comme dans les autres régions couvertes de terrains salés, plus humides et mieux connues, une notion nuancée, qui varie avec le stade de développement des végétaux et demande à être interprétée comme celle de la salinité des sols.

En outre, les eaux salées, qui sont extrêmement fréquentes, ne doivent être utilisées qu'avec beaucoup de prudence et toujours sur des terrains perméables ou facilement drainables.

En principe, les eaux ayant plus de 10 g de résidu sec doivent être éliminées car leur emploi rend la culture aléatoire, les récoltes étant souvent très faibles et parfois même nulles. Au-dessus de 6 à 7 g d'extrait sec par litre, elles ne doivent être utilisées que dans des cas très particuliers.

Avec des eaux moins salées, plus largement utilisables, il faut cependant, par suite de leur minéralisation élevée, respecter les règles suivantes :

1°) arrosages fréquents pour stabiliser les solutions du sol ;

2°) maintien de la concentration saline des solutions du sol au niveau de celle des eaux d'irrigation ;

3°) arrosages abondants au début de l'hiver pour lessiver les sols sursalés pendant la saison chaude ;

4°) supression des cultures d'été afin de ne pas abuser des irrigations pendant la période où l'évaporation est intense ;

5°) réalisation de cultures tardives ou précoces, abondamment fumées tant au point de vue organique que minéral (azote) pour augmenter la résistance aux sels des plantes ;

6°) pratique de la jachère hivernale travaillée.

Reçu pour publication en septembre 1962

SUMMARY

Utilization of saline waters in the Sahara

The effect of irrigation with waters of high mineral content (1.5 to 7 g dry residue per litre) on various cultivated crops was investigated at the experimental stations of the Sahara in Algiers and in Southern Tunisia. All the waters contained much sodium and the depth of the watertable varied between 1 and 10 metres.

The resistance of different crops to various salts varied according to their species and variety; salt resistance also varied during the growth period of plants and was often low at the time of germination.

Cultivated crops could be listed according to their salt tolerance : date palm, cotton, lucerne, sweet clover, asparagus, beets, leek and radish are the most resistant, while citrus, strawberry and beans are the most susceptible.

Cultivation using saline waters under an arid climate carries the danger of a secondary salinization of the soil. To avoid this, cultivation should only be done on permeable soils protected by a drainage system against the rise of groundwater. While irrigation has to be frequent throughout the growth period, it should be carried out on a limited scale during the dry and hot season. Irrigation conducted with less saline water early in winter serves especially for leaching the salt accumulated in the upper horizon of soil. Winter fallows or cultivation of green manure during the winter season produce good results. The use of windbreaks reduces evaporation and, consequently, the water requirements of the culture.

ZUSAMMENFASSUNG

Verwendung der salzigen Wasser der Sahara

Die Wirkung der Bewässerungen mit mineralisiertem Wasser (1,5-7 g pro Liter) wurde auf verschiedene Kulturen, sowohl in den Versuchsstationen der algerischen Sahara wie im Süden Tunesiens beobachtet. Diese Wasser waren oft sehr sodisch, und die Tiefe des Grundwasserspiegels 1-10 m je nach Fall.

Die Resistenz der verschiedenen Kulturen gegenüber den verschiedenen Böden ist nicht die

gleiche, weder nach Art noch nach Sorte. Sie ist auch nicht konstant im Laufe der Entwichlung der Pflanze. Meist ist sie im Augenblick des Auflaufens am schwächsten.

Manche Kulturen (Tomate, Pfeffer, Paprika usw) vermögen sich im Kontakt stark mineralisierter Böden weiter zu entwickeln, werden jedoch dann von Krankheiten befallen. Ein Trockenrückstand von 10 g pro 1 scheint die Grenze zu sein, die die meisten Gemüsearten dieser Gegend nicht überschreiten können.

Es konnten Listen von Kulturen aufgestellt werden, je nach der Salztoleranz : Dattelpalme, Baumwolle, Luzerne, Steinklee, Spargel, Rüben, Lauch, Radieschen sind die widerstandsfähigsten ; Citrusfrüchte, Erdbeere, Bohne hingegen die empfindlichsten.

Kultur unter solchen Bedingungen mit trockenem Klima und salzigem Wasser kann u. U. eine sekundäre Salinisation des Bodens herbeiführen. Um dies zu verhindern, soll man nur in durchlässigem und durch Drainage gegen ein Emporsteigen des Grundwassers geschütztem Boden solche Kulturen anlegen. Über das ganze Wachstum hindurch soll häufig begossen werden, mit Verringerung während der trockenen und heissen Jahreszeit. Bei Beginn des Winters mit weichem Wasser ausgeführt, sollen dadurch die Salze im oberen Horizont abgeschwemmt werden. Winterbrache und Gründüngung ergeben gute Resultate. Windschutz verhindert die Verdunstung und somit die Wasserbedürfnisse des Betriebs.

РЕЗЮМЕ

Применение соленых вод в сахаре.

П. СИМОННО и Г. ОБЭР (О.Р.С.Т.О.М.).

Авторы наблюдали действие минерализированных ирригационных вод (от 1,5 до 7 гр. сухого остатка на литр) на различные сельскохозяйственные растения на разных опытных станциях Алжирской Сахары и на юге Туниса. Воды эти были сильно осолены и зеркало грунтовых вод находилось, в зависимости от случая, на глубине от 1 до 10 метров.

Сопротивляемость различных культур различным солям была неодинаковой и не зависела ни от рода растения, ни от его разновидности. Она не являлась постоянной за все время развития растения и часто была наименее сильной в момент прорастания. Некоторые растения (помидоры, стручковый красный перец, зеленый перед и др.) при соприкосновении с сильно минерализированными почвенными растоврами, продолжали свое развитие, но подвергались при этом заболеваниям. Сухой остаток в 10 гр. на литр в этих растворах являлся как-бы границей, которую большая часть огородных насаждений этого района не могла порейти.

Авторы составили списки различных сельскохозяйственных растений в смысле их терпимости по отношению к осолению : финниковая пальма, хлопчатник, люцерна, донник, спаржа, бурак, порей, редиска, могут быть причислены к растениям наиболее солеустойчивым; цитрусовые, клубника и фасоль — к наиболее чувствительным.

Культура проводимая в условиях безводного климата и засоленности воды, рискует вызвать вторичное осоление почвы. Чтобы этого избежать, необходимо увеличить водопроницаемость почвы и защитить посадки от повышения уровня грунтовых вод, при помощи искуственного дренажа. Поливки должны производиться часто на всем протяжении культуры, но во время сухого и жаркого сезона необходимо предвидеть уменьшение их количества. В начале зимы поливки эти служат для вымывания солей накопившихся в верхнем горизонте почвы и лучше всего использовать для них наиболее пресную воду. Зимний черный пар, или культура зеленых удобрений в это время года, также дают хорошие результаты. Ветроломные полосы, ослабляя испарение уменьшают благодаря этому нужды хозяйства во влаге.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUREAU P., COINTEPAS J. P., RŒDERER P., GILBERT J. 1959. Tolérance à l'eau salée de quelques cultures pratiquées en Tunisie. *S.S.E.P.H.*, Rép. Tunis. ES 16.

COINTEPAS J. P., 1960. Compte rendu concernant la parcelle d'essais de Ksar Rhilane. *S.S.E.P.H.*, Rép. Tunis., ES 30.

COINTEPAS J. P., NOVIKOFF G., DAMAGNEZ G., 1960. L'irrigation à l'eau salée en Tunisie. *S.S.E.P.H.*, Rép. Tunis. ES 31.

DESSUS P., 1950. Note sur l'utilisation des terres salées du Territoire du Sud. La *Tunisie agricole*, mars.

EATON F. M., 1942. Toxicity and accumulation of chloride ans sulfate salts in plants. *Agric. Res.*, 357-397.

NOVIKOFF V., 1946. Note sur l'utilisation des eaux salées. *An. Sew. Bot. te Agr. Tunisie*, **19**.

PENET, 1913, Quelques particularités de l'irrigation d'oasis. *Bull. Dir. Agri. Tunis*, 371-380.

SIMONNEAU P. 1961. Les Centres d'Études d'Irrigation du Sahara occidental — Essais et études de la campagne 1957-58 - 1958-59 - 1959-60. *Trav. Sect. Pédologie et Agrologie* n° 5 et 6. — Publ. Service des Études Scientifiques.

SIMONNEAU P., 1961. Les phénomènes temporaires de salinisation des sols irrigués en Algérie et au Sahara. *Ann. agron.*, **12** (6).

SIMONNEAU P., 1962. La culture des céréales au Sahara. *Conférence Internationale des Arts Chimiques*, Paris.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 873-880

NOTE ANALYTIQUE

POSSIBILITÉS DE FORMATION DE PYROPHOSPHATES LORS DE LA CALCINATION DES VÉGÉTAUX. LEURS CONSÉQUENCES SUR LE DOSAGE DE P

Rose MAZOYER
avec la collaboration technique de Irène AGIUS.

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes (Alpes.-Maritimes)

SOMMAIRE

La séparation quantitative des pyrophosphates et des orthophosphates sur résine anionique a permis de mettre en évidence la présence de pyrophosphates dans les cendres de végétaux « pauvres en éléments basiques », ces cendres étant obtenues par simple calcination au four à moufle à la température de 500-550°C. A la suite de cette étude théorique, l'auteur a formulé quelques remarques d'ordre pratique concernant le dosage de P_2O_5 dans les végétaux.

INTRODUCTION

En 1956, dans les comptes rendus des travaux des Stations de l'I. N. R. A., nous avions schématisé les difficultés rencontrées dans le dosage de P_2O_5 pour certains végétaux « pauvres en éléments basiques ». La minéralisation de tels végétaux était conduite par voie sèche c'est-à-dire par calcination au four à moufle sans adjuvant basique suivie du dosage de P par la méthode colorimétrique au vanadate, méthode de MISSON (1908).

Nous reproduisons ici cette note :

« Il est établi depuis longtemps déjà, que pour une minéralisation par calcination, en vue d'un dosage d'acide phosphorique, sur des végétaux « pauvres en constituants basiques », il est nécessaire de mélanger préalablement à l'échantillon à calciner, de

l'acétate de calcium ou de magnésium. Or, en employant la méthode colorimétrique au Vanadate, nous avons pu remarquer que lorsqu'on calcine de tels végétaux, sans addition supplémentaire d'acétates basiques, il n'y avait pas, à proprement parler, perte de phosphore, selon la formule couramment employée.

En effet, après calcination à 530-550°C du matériel végétal, sans addition de constituants basiques, on reprend les cendres par HCl concentré et on évapore à sec (insolubilisation de la silice). Puis on dissout le résidu dans HCl dilué au 1/10, on filtre et on lave à l'eau chaude jusqu'à un volume défini (généralement 100 cc pour 1 g de matériel végétal). Sur le filtrat on dose P_2O_5 par la méthode colorimétrique au vanadate (méthode MISSON). On peut alors constater que pour des végétaux pauvres en calcium (< 1,0 p. 100) et moyennement riches en P_2O_5 (environ 0,5 p. 100) le développement de la coloration jaune du complexe n'est définitif qu'après plusieurs jours (2,3 et même 8 jours selon les végétaux), alors que dans la majorité des cas (Ca > 1,0) il suffit d'attendre 1/4 d'heure. Les résultats en P_2O_5, après cette attente de plusieurs jours, sont identiques à ceux obtenus par la même méthode colorimétrique en présence d'acétate de chaux (le développement de la couleur dans ces conditions se faisant, dans tous les cas, en 1/4 d'heure).

» Il n'y a donc pas perte de phosphore. Il semble seulement que ce dernier se trouve sous des formes non immédiatement dosables par la méthode au vanadate, probablement sous forme de pyro et même intermédiairement de métaphosphates. Ces derniers (en milieu chlorhydrique) s'hydrolysent lentement en ortho, seule forme de phosphates immédiatement dosables par le vanadate.

» Il est possible d'activer cette hydrolyse en faisant bouillir le résidu de la calcina-

TABLEAU I

Nous avons consigné dans le tableau suivant, quelques-uns des résultats qui nous ont conduits à ces remarques

Nos	Ca %	Calcination sans acétate de Ca				Calcination en présence d'acétate de Ca			Calcination sans acétate de Ca, mais ébullition en présence de NO_3H 10 %		
		Lecture du colorimètre			P_2O_5 %	Lecture du Colorimètre		P_2O_5 %	Lecture du colorimètre		P_2O_5 %
		1/4 h	3 j	8 j		1/4 h	8 j		1/4 h	8 j	
Kx_1	0,26	29	30,5	32	0,21	32	32	0,21	31,5	31,5	0,21
Kx_2	0,33	23	23,5	23,5	0,16	24	24	0,16	24,0	24,0	0,16
						après dilution					
LQ	0,26	87	> 100		0,63	51	51,5	0,63	50,5	50,5	0,64
LS	0,22	84	92	95	0,60	95	95	0,60	94	95	0,61
						après dilution					
LL	0,17	85,5	> 100	> 100	0,64	52	52	0,64	51,5	52	0,64

tion en présence de NO_3H 10 p. 100 sans aller à sec. Dans ce cas la coloration jaune apparaît totalement au bout d'1/4 d'heure. On évite ainsi une calcination spéciale du matériel végétal en présence d'acétate de chaux, et cette méthode permet de doser sur le même filtrat, P_2O_5, K, Ca, Mg. »

Les travaux récents de WINAND (1962) sur une séparation quantitative d'orthophosphates et de pyrophosphates sur résine anionique nous ont permis de mettre en évidence ce qui n'était, pour nous, qu'une hypothèse faite à la suite de remarques d'autres auteurs comme PIPER (1950) à savoir qu'il se formait des pyrophosphates dans une calcination de végétal pauvre en cations Ca ou Mg ce qui n'était pas le cas pour un végétal riche en de tels cations.

PLAN DE TRAVAIL

Sur une solution étalon contenant des quantités connues de pyrophosphates et d'orthophosphates nous avons préalablement étudié leur séparation en nous inspirant de la méthode proposée par WINAND (loc. cit.) puis nous avons essayé cette séparation sur les extraits chlorhydriques des cendres végétales.

1°) SÉPARATION DES ORTHO- ET PYROPHOSPHATES DANS DES SOLUTIONS ÉTALONS

Protocole adopté et résultats obtenus

a) *Réactifs.* — Résine Dowex 1 X8 50-100 mesh. HCl R. P. 2N. HCl R. P. N/2. HCl R. P. N/10. HCl R. P. N/100. Solution d'orthophosphate de K dosant 1000 γ de P_2O_5/cc. Solution de pyrophosphate de Na dosant approximativement 1000 γ de P_2O_5/cc.

b) *Préparation de la résine.* — La résine est mise à gonfler 24 h dans l'eau déminéralisée puis elle est introduite dans une colonne de verre (Burette) sur une hauteur de 18 à 20 cm. Le diamètre de la colonne est de 12 à 14 mm. Laver la résine avec 50 cc. HCl 2N. Rincer à l'eau déminéralisée jusqu'à élimination des ions Cl^-. Laver avec 50 cc HCl N/100.

La résine est prête à l'emploi.

Nous avons fait passer sur des colonnes de résine ainsi préparée des solutions dosant dans 10 cc. des quantités variables de P_2O_5 ortho et P_2O_5 pyro.

Nous avons vérifié d'abord que dans le percolat il n'y avait plus de P_2O_5 soit ortho, soit pyro. Dans ces conditions, nous pouvons conclure que ces ions sont quantitativement fixés sur la résine.

c) *Élution de* P_2O_5 *et dosage.*

1°) Élution et dosage de P_2O_5 ortho : Placer sous la colonne de résine un ballon jaugé de 50 cc. Éluer avec HCl N/20 jusqu'au trait de jauge. Doser sur une partie aliquote P_2O_5 ortho par la méthode colorimétrique au Vanadate.

2°) Élution et dosage de P_2O_5 pyro : Mettre sous la colonne de résine un bécher de 150 cc. Éluer par 50 cc HCl N/2. Ajouter 5 cc de NO_3H 10 p. 100. Maintenir au bain-marie bouillant 1 h pour hydrolyser les pyrophosphates en orthophosphates. Il ne faut pas laisser aller à sec. Faire passer la solution dans un ballon jaugé de 50 cc en rinçant le bécher avec l'eau déminéralisée. Après refroidissement compléter au trait de jauge par l'eau déminéralisée. Sur une partie aliquote faire un dosage colorimétrique de P_2O_5 ortho au vanadate.

L'élution des orthophosphates est parfaitement quantitative et n'a posé aucun problème. Il n'en n'a pas été de même dans les essais préliminaires pour les pyrophosphates. La première difficulté a été d'avoir un sel pur et de faire, par pesée, une solution étalon. L'expérience a montré que la façon la plus simple d'opérer et en même temps la plus satisfaisante était de faire une solution approchée en P_2O_5 pyro et de doser cette dernière avant, puis après passage sur résine. D'autre part l'élution

des pyrophosphates doit être très lente (au maximum 1 cc. par minute) et il faut au minimum 50 cc d'HCl N/2 pour éluer 130 γ de P_2O_5 pyro fixés sur la résine. Opérant ainsi, nous avons pu alors constater que les pyrophosphates étaient quantitativement élués par HCl N/2

2°) Séparation des ortho- et pyrophosphates dans les extraits chlorhydriques des cendres végétales

Devant le succès obtenu pour cette séparation d'ortho-et de pyrophosphates nous avons repris la calcination d'un certain nombre de végétaux en vue de la séparation des ortho- et des pyrophosphates éventuellement formés.

Nous avons suivi notre protocole de minéralisation habituel à savoir : Peser 1 ou 2 g de poudre végétale dans une capsule de quartz. Faire simultanément sur 1 g de poudre la matière sèche à l'étuve à 105°C. Faire une précalcination de 30 minutes environ sur une plaque chauffante. Calciner au four à moufle à 500-550° C, introduire la capsule dans le four froid ou tiède. Reprendre le résidu par 5 cc HCl R. P. concentré. Évaporer au bain de sable jusqu'à sec. Mouiller avec 5 cc d'eau déminéralisée. Amener de nouveau à sec sur bain de sable. Maintenir 1 heure sur le bain de sable. Reprendre le résidu par 5 cc HCl 10 p. 100 (la capsule étant encore chaude). Filtrer immédiatement sur ballon jaugé de 100 cc. Laver à l'eau chaude. Compléter à 100 cc après refroidissement à la température ambiante.

N. B. — Pour passer sur résine on doit être en milieu HCl N/100 ; dans ce cas, on reprend le résidu par 10 cc HCl N/10.

Nous avons prélevé 2-5 ou 10 cc de ces solutions selon les teneurs présumées en P_2O_5. Nous avons fait passer cette solution sur la résine suivant le protocole précédent pour essayer de séparer les ortho- et les pyrophosphates.

RÉSULTATS

Les résultats obtenus exprimés en P_2O_5 pour cent de la matière sèche sont consignés dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Nos	(1) K	(2) Ca	(3) Mg	(4) P_2O_5 ortho après passage sur résine	(5) P_2O_5 pyro après passage sur résine	(6) P_2O_5 ortho + pyro après passage sur résine	(7) P_2O_5 dans l'extrait chlorhydrique après ébull. avec NO_3H 10 %	(8) P_2O_5 dans l'extrait chlorhydrique sans hydrolyse des pyro
1	1,71	0,49	0,08	0,85	0,68	1,53	1,54	0,84
2	6,19	0,55	0,31	1,24	0,17	1,41	1,38	1,24
3	5,12	0,59	0,05	0,59	1,00	1,59	1,57	0,56
4	5,43	0,46	0,05	0,74	1,36	2,10	2,10	0,55
5	5,30	0,49	0,08	0,92	0,74	1,66	1,66	0,92
6	4,58	0,44	0,03	2,10	0,55	2,65	2,53	2,00
7	4,33	0,46	0,03	1,09	1,29	2,38	2,39	0,92
8	4,77	0,56	0,68	3,50	0,93	4,43	4,30	3,50
9	3,93	0,51	0,44	2,39	1,59	3,98	3,92	2,23
10	6,04	0,56	0,59	1,51	0,53	2,04	1,92	1,43

Les chiffres obtenus sont parfaitement concluants. La quantité de pyrophosphates formés est d'autant plus élevée que la concentration en Ca ou Mg est plus faible quelle que soit la concentration en K. Le dosage de P sur l'extrait chlorhydrique, sans qu'on ait procédé à une hydrolyse, ne donne pratiquement que les orthophosphates (si l'on fait le dosage assez rapidement) comme le montrent les résultats des colonnes (4) et (8). La somme des P_2O_5 ortho et des P_2O_5 pyro correspond à la quantité de P_2O_5 total obtenu sur l'extrait chlorhydrique mais après hydrolyse des P_2O_5 pyro, à l'erreur analytique près comme le montrent les résultats des colonnes (6) et (7).

Nous avons alors recommencé ces opérations sur des végétaux riches en Ca et en Mg. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Nos	(1) K	(2) Ca	(3) Mg	(4) P_2O_5 ortho après passage sur résine	(5) P_2O_5 pyro après passage sur résine	(6) P_2O_5 ortho + pyro après passage sur résine	(7) P_2O_5 dans l'extrait chlorhydrique après ébull. avec NO_3H 10 %	(8) P_2O_5 dans l'extrait chlorhydrique sans hydrolyse des pyro
11	0,94	1,88	0,46	0,51	0	0,51	0,51	0,51
12	3,57	1,39	0,21	0,61	0	0,61	0,63	0,60
13	3,44	1,43	0,13	0,63	traces	0,63	0,65	0,63
14	0,31	2,78	1,15	0,24	0	0,24	0,25	0,25
15	0,36	3,25	0,86	0,27	0	0,27	0,27	0,26
16	0,57	2,50	1,11	0,28	0	0,28	0,30	0,27
17	0,47	3,24	0,97	0,27	0	0,27	0,27	0,25
18	2,46	1,83	0,35	0,66	0	0,66	0,67	0,66
19	2,86	2,74	0,26	0,75	0	0,75	0,76	0,75
20	4,43	2,25	0,20	0,96	traces	0,96	1,02	0,98

Pour ces végétaux il ne s'est pas produit de pyrophosphates au cours de la calcination et les chiffres des colonnes (4), (7) et (8) sont concordants à l'erreur analytique près.

Que se passe-t-il au cours de la calcination ?

Les manuels de chimie nous apprennent que les pyrophosphates s'obtiennent principalement par chauffage à 200°C des phosphates acides. Celui du potassium obtenu à partir de PO_4HK_2, H_2O commence à se former vers 180° mais sa formation est très lente, elle est cependant beaucoup plus rapide si l'on porte la température brutalement à 340° d'où la précaution d'introduire le matériel à calciner dans un four froid ou tiède et de faire une précalcination sur plaque chauffante en montant progressivement la température.

En conséquence, pour éviter pendant la calcination des poudres végétales la formation de pyrophosphates, il faut éviter la formation de phosphates mono ou diacides d'où l'obligation d'être en milieu alcalin. Ce milieu alcalin se produit tout naturellement à la calcination pour des végétaux riches en calcium ou en magnésium.

En effet, leurs sels d'acides minéraux ou organiques se décomposent à la chaleur en donnant CaO ou MgO en passant très probablement par l'intermédiaire des carbonates.

CONCLUSION

L'étude des résultats obtenus nous permet de tirer quelques conclusions pratiques de ce travail théorique.

1°) Pour des végétaux pauvres en Ca ou Mg, que nous chiffrons en moyenne inférieurs à 1 p. 100 en Ca et moyennement riches en P_2O_5 (0,5 p. 100), il est nécessaire — ce que l'on savait et faisait depuis longtemps — d'ajouter à la poudre végétale avant la calcination, soit un sel (NO_3Mg, CO_3Ca, $(CH_3COO)_2Ca$...) donnant par décomposition à la chaleur une base, soit directement une base.

Notons que K_2O et Na_2O ne se formant pas par décomposition des sels potassiques ou sodiques, la présence de ces derniers, même en quantités assez élevées dans les végétaux à analyser, n'introduisent pas d'éléments basiques au cours de la calcination, comme le montrent quelques résultats du tableau 2.

2°) Pour des végétaux pauvres en calcium ou en magnésium, le risque de formation de pyrophosphates à la calcination, nécessite, si l'on veut éviter une calcination basique supplémentaire, l'hydrolyse des pyrophosphates formés, comme nous l'avions proposé en 1956. Les nouveaux travaux entrepris pour ce travail ont montré que l'hydrolyse la plus efficace et présentant le moins de risques de pertes, est d'opérer dans un petit bécher sur une partie aliquote de l'extrait chlorhydrique des cendres obtenues selon notre protocole de minéralisation, protocole qui nous permet de doser sur le même extrait P, K, Ca, Na, Mg, éventuellement Fe, Mn, Cu,... Cette partie aliquote, généralement 10 cc, est diluée avec 15 cc d'eau déminéralisée. On ajoute 5 cc de NO_3H 10 p. 100 et on laisse au bain-marie bouillant 1 heure, ensuite on fait passer la solution dans un ballon jaugé de 25 ou 50 cc et on fait la colorométrie au vanadate sur 10 cc. Les quantités d'acide nitrique ajoutées en fonction de leur efficacité d'hydrolyse doivent être définies avec assez de précision par l'analyste car il ne faut pas perdre de vue que la méthode colorimétrique de Misson exige, comme toute méthode colorimétrique, des conditions assez strictes d'acidité et, dans certains cas où les quantités d'acide nitrique ajoutées seraient trop importantes, il conviendrait de reproduire ces mêmes conditions d'acidité dans la gamme étalon qui servirait au dosage. La reprise directe des cendres par NO_3H comme nous le faisions antérieurement suivie d'une ébullition est, d'une part, très délicate, elle nécessite des capsules larges à fond rond car il y a risque possible de pertes par projection, d'autre part, elle donne un extrait nitrique, or, nous préférons garder l'extrait chlorhydrique pour le dosage des autres cations qui, dans certains cas de nos protocoles usuels d'analyse, est préférable à l'extrait nitrique.

3°) Dès le moment où l'on reprend les cendres par l'acide chlorhydrique dilué, l'observation de formation ou d'absence de bouillonnement indiquant des dégagements de CO_2 peut montrer que l'on est en présence de cendres de végétaux riches ou pauvres en Ca et Mg. En effet, pour ces végétaux pauvres en ces deux cations (toutes les observa-

tions faites dans ce sens, actuellement, le confirment) leurs cendres ne sont pas carbonatées, donc le dosage de P_2O_5 nécessitera une hydrolyse des pyrophosphates formés.

Cette étude de séparation sur résine anionique fortement basique nous autorise à faire, en marge de cette étude sur le dosage de P_2O_5, une remarque importante sur l'élimination de P_2O_5 par les résines quand, en quantité trop importante, ce dernier interfère dans le dosage de Ca soit par photométrie de flamme soit par le versénate. En effet plusieurs auteurs signalent des échecs dans cette séparation. Si on utilise une résine fortement basique type Dowex 1 ou Amberlite I. R. 400, il convient de prendre grand soin de la molarité en HCl du milieu car en milieu HCl N/20, il y a « désorption » de P_2O_5 ortho. Pour WINAND (loc. cit.) : « La concentration en ions Cl^- ne peut être supérieure à N/50 sans quoi les ions phosphoriques ne se fixent pas sur la colonne. »

Reçu pour publication en mars 1963.

SUMMARY

THE POSSIBILITY OF PYROPHOSPHATE FORMATION DURING CALCINATION OF PLANTS. ITS EFFECT ON THE DETERMINATION OF PHOSPHORUS

Quantitative separation of pyrophosphates and orthophosphates on anion exchanger showed the presence of pyrophosphates in the ash of plants poor in bases, after simple calcination at 500-550°C in the oven. After a theoretical discussion, some pratical remarks are made on the determination of P_2O in plants.

ZUSAMMENFASSUNG

MÖGLICHKEITEN DER BILDUNG VON PYROPHOSPHATEN BEI DER VERGLÜHUNG VON PFLANZEN UND DEREN FOLGEN AUF DIE DOSIERUNG DES PHOSPHORS

Die quantitative Trennung der Pyro- und Orthophosphaten auf anionischem Harz konnte die Gegenwart von Pyrophosphaten in der Asche der an « basischen Elementen armen » Pflanzen herausstellen ; diese Asche erhielt man durch einfaches Verglühen im Muffelofen bei 500-500°C. Als Folge dieses theoretischen Studiums formulierte der Verfasser einige praktische Bemerkungen über Dosierung von P_2O_5 in Pflanzen.

РЕЗЮМЕ

Возможность образования пирофосфатов в процессе сжигания растений и отражение этого явления на дозаже фосфора. (Аналитическая заметка).

РОЗА МАЗУАЙЕ (Антиб).

Количественное разлучение пирофосфатов и ортофосфатов при помощи анионной камеди позволило определить присутствие пирофосфатов в золе растений « бедных щелочными элементами », золе — полученной от простого сжигания в муфельной печи при температуре в 500-550°. После этого теоритического очерка, автор формулирует несколько замечаний практического характера относящихся к количественному определению P_2O_5 в растениях.

Ann. agron., 1963, **14** (5), 881.

CHRONIQUE DES LIVRES

GRAČANIN. — VERBREITUNG UND WIRKUNG DER BODENEROSION IN KROATIEN (Répartition et action de l'érosion du sol en Croatie). Giessener Abhandlungen zur Agrar-und Wirtschaftsforschung des europäischen Ostens. Band 21. — Giessen, *Wilhelm Schmitz*, 1962, 335 *p*.

L'Auteur, en se basant sur des études et observations personnelles ainsi que sur une abondante documentation bibliographique, se propose de faire le point des connaissances actuelles sur l'érosion en Croatie : répartition, facteurs, mécanisme, conséquences, mesures de protection.

La première partie de l'ouvrage est consacrée à l'examen des conditions naturelles et économiques constituant les facteurs de l'érosion : structure géologique, climatologie, hydrographie, couverture végétale, peuplement humain, types de sols.

La seconde partie étudie les effets de l'érosion sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, ainsi que la genèse et la morphologie des types de sols des régions les plus typiquement érodées du pays : karst, sédiments flyschiens de l'éocène, régions lœssiques, schistes werféniens, sols podsoliques.

La troisième partie expose les mesures de lutte contre l'érosion. Après l'examen des conditions socio-économiques d'une lutte efficace (textes législatifs sur la conservation du sol, réglementation de la propriété, éducation des masses, moyens financiers à mettre en œuvre), on passe en revue les mesures destinées à améliorer la résistance du sol à l'érosion, le rôle protecteur de la couverture végétale, dans le cas des terres de culture, des prairies et des forêts, l'écoulement des eaux non infiltrables.

Une abondante bibliographie de 33 pages complète cette excellente étude, qu'illustrent 120 reproductions photographiques, la plupart de l'Auteur lui-même, et 16 cartes.

D. K.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 20-12-63.

Dépôt légal : 4e trimestre 1963. *N° d'impression : 1231.*

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 885-918

RECHERCHE D'UNE MÉTHODE D'EXTRACTION ET DE FRACTIONNEMENT DES COMPOSÉS HUMIQUES CONTRÔLÉE PAR L'ÉLECTROPHORÈSE

Ph. DUCHAUFOUR et F. JACQUIN

Centre de Pédologie, C.N.R.S., Nancy-Vandœuvre (Meurthe-et-Moselle) ;
École nationale supérieure agronomique, Nancy (Meurthe-et-Moselle)

avec la collaboration technique de Monique DUSAUSOY et Françoise PERRIN
Centre de Pédologie, C.N.R.S., Nancy

SOMMAIRE

Une méthode d'extraction chimique et de fractionnement des composés humiques du sol (acides fulviques et humiques) a été mise au point à l'aide de pyrophosphate de sodium comme réactif d'extraction : les 2 premières extractions effectuées à l'aide de pyrophosphate additionné de ClNa permettent d'extraire les acides humiques bruns, peu polymérisés ; alors que les 2 dernières extractions à l'aide de pyrophosphate seul, extraient les acides humiques gris, plus polymérisés.

Le contrôle de ce procédé par l'électrophorèse sur papier montre qu'il est efficace pour les sols à humus évolué, à complexe argilo-humique stable, peu efficace par contre pour les humus peu évolués, riches en matières organique fraîche : l'alcalinité du milieu, qui augmente au cours des extractions successives, provoque, en effet, la néoformation d'acides humiques bruns aux dépens de la matière organique fraîche.

Le rapport acides fulviques/acides humiques, la répartition globale des acides humiques en trois catégories (bruns — intermédiaires — gris), d'après le fractionnement chimique, corrigé par les données de l'électrophorèse, et enfin le taux d'humification (carbone des composés humiques/carbone total) servent à caractériser la genèse et les propriétés des différents humus étudiés : les rôles de la teneur en calcium et surtout des variations microclimatiques dans l'humification ont pu ainsi être mis en évidence.

INTRODUCTION

1) *But de cette étude*

La matière organique, qu'on peut considérer comme l'intermédiaire par lequel le monde vivant agit sur le monde minéral, joue, on le sait, un rôle essentiel dans la pédogenèse. Il est donc important de caractériser les « types d'humus » des différents sols pour bien comprendre leurs propriétés et les phases de leur révolution.

L'étude chimique détaillée des constituants de la matière organique offre évidemment un grand intérêt : l'un de nous (JACQUIN, 1959 — 1960 — 1962) a récemment entrepris cette étude en utilisant entre autres méthodes, la chromatographie.

Mais les recherches qui font l'objet du présent article ont un but plus modeste et d'ailleurs très différent : elles visent à mettre au point une méthode simple et pratique permettant de caractériser *les différents types d'humus par leurs propriétés physico-chimiques essentielles*. La classification des types d'humus comme celle des types de sols ne peut être que « synthétique », c'est-à-dire qu'elle doit s'appuyer sur un ensemble de caractères coordonnés, morphologiques, biologiques, et physico-chimiques : parmi ces caractères, les processus d'*humification bio-chimiques* sont particulièrement importants ; ils donnent naissance à des composés organiques de néoformation, différents de la matière organique végétale originelle, les « composés humiques », ou encore l'« humus » au sens strict, dont la quantité existant dans le sol et les propriétés telles que la polymérisation des molécules, le mode et le degré de liaison avec la matière minérale, jouent un rôle capital dans l'évolution du sol : une méthode valable doit donc être *universelle*, c'est-à-dire s'appliquer à tous les types d'humus, aussi bien ceux qui sont peu évolués que ceux qui sont fortement transformés par voie biologique.

Or il faut reconnaître qu'il n'existe pas encore de méthode pratique, de valeur universellement reconnue, d'extraction des composés humiques, permettant des comparaisons valables entre les sols. Les raisons en sont bien connues et nous nous bornerons à les rappeler très rapidement :

1°) difficulté de trouver un réactif d'extraction, séparant électivement les composés humiques sans les transformer, voire sans en augmenter artificiellement la quantité ;

2°) difficulté de fractionner les composés extraits en éléments plus ou moins solubles, plus ou moins polymérisés, ou liés plus ou moins étroitement à la matière minérale ;

3°) problème de l'élaboration d'une « méthode d'extraction » valable ; les extractions successives semblent indispensables pour extraire la totalité des composés humiques préexistant, mais elles présentent aussi l'inconvénient d'augmenter le risque d'une formation artificielle de composés humiques nouveaux par action chimique sur les éléments végétaux incomplètement transformés ou par polymérisation de produits solubles ;

4°) difficulté de mettre au point une méthode de dosage à la fois précise et rigoureuse.

Pour résoudre cet ensemble de difficultés, il nous a paru indiqué de faire appel à une *méthode de contrôle*, récemment mise au point par l'un de nous (JACQUIN, 1961) ; il s'agit de l'*électrophorèse* sur papier des acides humiques, préalablement dissous dans la soude : cette méthode permet de caractériser remarquablement la *mobilité*, donc le *degré de polymérisation* de ces acides humiques.

Les buts de la présente étude sont alors les suivants :

1°) mettre au point une méthode chimique d'extraction et de fractionnement simple des composés humiques en fonction de leur degré de polymérisation et de liaison avec la matière minérale ;

2°) contrôler cette méthode en soumettant à l'électrophorèse les fractions ainsi séparées, ce qui permettra de vérifier l'efficacité du fractionnement obtenu par voie chimique ;

3°) compléter ce fractionnement chimique par l'électrophorèse : en effet, la simple séparation physico-chimique par modification de la nature du réactif d'extraction est nécessairement grossière et incomplète : elle ne permet qu'une séparation approximative ; chaque fraction soumise ensuite à l'électrophorèse donnera lieu à une identification plus précise et plus détaillée de ses constituants : les deux méthodes se complètent donc de manière satisfaisante ;

4°) dégager certaines conclusions concernant les caractères et la genèse des humus étudiés à titre d'exemple.

2) *Choix du matériel : Sols et Humus étudiés*

Pour ce premier travail, qui visait essentiellement à mettre au point une méthode, nous avons sélectionné 15 sols que nous considérons comme très caractéristiques, pour leur humus à propriétés bien définies ; nous avons choisi des types aussi différents que possible de façon à contrôler l'universalité des méthodes ; cependant, dans chaque catégorie fondamentale (Mull, Moder, Mor, Mull calcique, Anmoor), nous nous sommes efforcés d'étudier deux types, soit identiques, soit très voisins, de façon à obtenir une répétition, nous donnant toute sécurité dans l'interprétation des résultats. Pour cette étude nous nous sommes limités à des types de sols tempérés, prélevés en France, à l'exception de deux sols de steppe venant du sud de la Russie.

La liste des sols étudiés est alors la suivante (pour chaque horizon, l'épaisseur est indiquée en centimètres, entre parenthèses):

P_1 — Podzol humo-ferrugineux à Mor, sur grès vosgien ; alt. 550 m. Forêt de Taintrux (Vosges).
Pineraie de Pin Sylvestre à *Calluna vulgaris* et *Vaccinium myrtillus*.
Profil : A_0 A_2 B_1 B_2 C.
Horizons étudiés : A_0 (10 cm), noir, fibreux, avec grains de quartz ;
B_1 (2 à 5 cm), brun-noir, humus formant une pellicule autour des grains de sable.

P_2 — Podzol humo-ferrugineux à Mor sur grès vosgien ; alt. 500 m. Col du Haut-du-Bois (Vosges).
Même type de végétation et même profil que le précédent.
Horizons étudiés : A_0 (7 cm), noir, fibreux.
B_1 (4 cm), brun foncé, semblable au précédent.

OP — Sol ocre podzolique à Moder sur granite. Forêt de Gérardmer (Vosges) ; alt. 900 m.
Sapinière à mousse et myrtilles.
Profil : A_0 A_1 B C.
Horizons étudiés :
A_1 (12 cm) : horizon noir, sableux, à grains de quartz brillants, structure particulaire meuble (cet horizon est surmonté d'un A_0 non prélevé de 2 à 4 cm).
B (30 cm) : horizon ocreux, à traînées brunes de matière organique s'infiltrant localement.

Rk_1 — Ranker pseudo-alpin à Moder sur granite. Hohneck (Haut-Rhin) ; alt. 1 300 m.
« Chaume », pelouse pseudo-alpine à *Nardus stricta* et *Festuca rubra*.
Profil : A_0 A_1 C.
Horizons étudiés : A_1 (15 cm) : horizon noir, matière organique granuleuse mélangée à des fragments d'arène, feutrage dense de racines.
A_1' (25 cm) : horizon brun foncé, arène imprégnée de matière organique passant progressivement à l'arène peu altérée.

Rk_2 — Ranker subalpin à Moder sur granite. Aumont-Aubrac (Lozère) ; alt. 1 200 m.
Pin sylvestre et lande à *Calluna vulgaris*.
Profil : A_0 A_1 C.
Horizon étudié : Sous un A_0 de 2 à 3 cm, un A_1 (20 cm), noir, à quartz brillants structure finement particulaire, feutrage de racines ; surmontant le granite en place.

TABLEAU I

Caractères analytiques des sols étudiés

Sols	Horizons	C (1)	N (1)	C/N	pH	CO_3Ca total (1)	CO_3Ca actif (1)	Ca^{++} (2)	Mg^{++} (2)	K^+ (2)	S (2)	T (2)	S/T %
P_1	A_0	34,64	0,92	37,6	3,1			4,65	3,84	0,79	9,28	92,8	10,0
	B_1	4, 56	0,19	24,0	3,9			0,24	trace	0,20	0,44	26,9	1,6
P_2	A_0	10,8	0,37	29,2	3,4			2,08	0,69	0,95	3,72	36,0	10,3
	B_1	3,14	0,14	22,4	3,8			0,21	0,53	0,13	0,87	17,3	5,0
OP	A_1	6,82	0,35	19,5	4,3			0,45	0,36	0,16	0,97	24,0	4,0
	(B)	4,02	0,18	22,3	4,9			0,16	trace	0,06	0,22	25,5	0,9
Rk_1	A_1	12,96	0,87	14,9	4,2			0,43	0,23	0,48	1,14	44,5	2,6
	A'_1	4,82	0,31	15,6	4,7			0,19	trace	0,10	0,29	26,2	1,1
Rk_2		6,66	0,37	18,0	4,9			0,43	trace	0,24	0,67	29,0	2,3
Br_1	A_1	6,53	0,36	18,1	5,9			15,0	1,24	0,84	17,08	24,0	71,2
Br_2	A_1	4,59	0,35	13,1	4,7			5,50	1,25	0,50	7,25	24,0	30,2
R_1	A_1	7,19	0,56	12,8	7,6	33,2	6,63		0,67	0,48		46,6	sat.
	A(C)	2,76	0,25	11,0	7,9	66,4	9,25		0,45	0,17		18,5	sat.
R_2	A_1	5,74	0,46	12,5	7,6	39,9	6,86		1,54	0,86		41,0	sat.
	A(C)	4,20	0,37	11,3	7,9	43,2	5,89		2,06	0,58		40,5	sat.
Ch_1	A_1	1,48	0,19	7,8	8,5	2,3			5,0	0,72		31,2	sat.
Ch_2	A_1	2,67	0,25	10,7	6,5			27,5	3,7	0,5	31,7	33,7	94
An_1	A_1	5,90	0,63	9,4	7,3	9,8	8,3		2,38	0,20		45,0	sat.
	A'_1	3,46	0,27	12,8	7,5	3,0	2,9		3,72	0,18		39,8	sat.
An_2		9,73	0,70	13,9	6,3			30,0	7,44	0,24	37,68	43,5	86,6
An_3		11,67	0,66	17,8	4,0			0,27	trace	0,14	0,41	34,3	1,2
T	TA_0	44,74	1,64	27,3	3,1			3,16	2,32	0,65	6,13	108,1	5,7
	T	47,51	1,20	39,6	2,9			1,08	1,42	0,07	2,57	102,5	2,5

(1) En pourcentage du sol sec à l'air.
(2) En méq pour 100 g.

Br_1 — Sol brun lessivé mésotrophe à Mull forestier, sur alluvions anciennes et Terra fusca ; massif de Haye (Meurthe-et-Moselle) ; alt. 300 m.
Hêtraie à flore d'humus doux.
Profil : A_1 A_2 B C.
Horizon étudié : A_1 (5 cm), Mull grumeleux, aéré, gris-brun passant sans transition nette à un A_2.

Br_2 — Sol brun, oligotrophe, à Mull acide sur granite. Forêt de Wissembach (Vosges) ; alt. 900 m.
Sapinière-hêtraie à *Festuca sylvatica* et *Mercurialis perennis*.
Profil : A_1 (B) C.
Horizon étudié : A_1 (12 cm), Mull grumeleux, épais, très aéré, gris-brun foncé.

R_1 — Rendzine forestière à Mull calcique, sur colluvium calcaire bajocien.
Fonds de Monvaux, forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle) ; alt. 250 m.
Chênaie-hêtraie clairiérée à arbustes calcicoles et à graminées.
Profil : A_1 C.
Horizons étudiés : A_1 (10 cm), Mull calcique noir, en gros grumeaux, très aéré ; quelques cailloux calcaires.
A_1C (15 cm), gris-brun, encore humifère, grumeaux irréguliers et nombreux cailloux.

R_2 — Rendzine forestière à Mull calcique, sur calcaire bajocien (calcaire à polypiers).
Chaligny, massif de Haye ; alt. 300 m.
Chênaie-Hêtraie à arbustes calcicoles.
Profil : A_1 C.
Horizons étudiés : A_1 (10 cm), Mull calcique, noir, en gros grumeaux, parsemé de cailloux calcaires.
A_1 (C) (10 cm), grumeaux humifères de couleur plus claire et nombreux cailloux calcaires ; transition avec l'horizon calcaire C.

Ch_1 — Sol châtain de steppe sur loess. Zolotoge pole, Crimée (U. R. S. S.). Couleur brun foncé ; sol cultivé.

Ch_2 — Chernozem typique sur loess. Mull de steppe. Belgorod, Ukraine (U. R. S. S.). Sol cultivé ; couleur noire.

An_1 — Anmoor calcique (fossile), évoluant vers le Mull calcique. Alluvions du Ried alsacien (Haut-Rhin) ; alt. 200 m.
Cultures.
Profil : A_1G.
Horizons étudiés :
A_1 (15 cm), Anmoor grumeleux de couleur noire transformé en Mull par assèchement superficiel.
A_1' (20 cm), horizon noir à taches rouille, structure massive, peu aérée, plastique, passage progressif au Gley, de couleur gris-vert très clair.

An_2 — Anmoor calcique tourbeux, sur alluvions récentes. Forêt de Sainte-Hélène (Vosges) ; alt. 300 m.
Aulnaie et marais à grands Carex.
Profil : A_1 G.
Horizon étudié : A_1 (20 cm) : horizon brun-noir, constamment saturé d'eau, limon humifère à structure massive.

An_3 — Anmoor acide sur colluvium fin de grès vosgien. Forêt de Rambervillers (Vosges); alt. 350 m.
Plantation d'Epiceas.
Profil : A_1G.
Horizon étudié : A_1 (20 cm) : brun foncé, limon humifère à structure massive, alternativement humide et sec.

T — Tourbe du Beillard, près de Gérardmer (Vosges) ; alt. 750 m.
Tourbe à Sphagnum, envahie par *Calluna vulgaris* dans les zones drainées.
Horizons étudiés : TA_0 (15 cm) : Hydromor, noir, finement granuleux provenant de l'évolution de la tourbe par assèchement superficiel.
T (1,50 m) : Tourbe proprement dite, couleur brune, structure fibreuse ; spongieuse et gorgée d'eau.

Les caractères analytiques et biochimiques des humus étudiés sont consignés dans le tableau 1.

A — RECHERCHES CONCERNANT LES MÉTHODES

I — Mise au point d'une méthode d'extraction chimique et de fractionnement des composés humiques

1) *Choix du réactif d'extraction*

Nous avons signalé cette difficulté fondamentale ; la plupart des réactifs d'extraction couramment utilisés présentent des inconvénients majeurs ; on se trouve en effet en présence d'un double danger, le premier, celui d'une *extraction incomplète :* il semble impossible d'extraire, par l'action d'un seul réactif, la totalité des composés humiques d'un sol, mais on doit rechercher le réactif le plus efficace à ce point de vue ; le second danger est inverse : il réside dans une *transformation des composés organiques* du sol avec néoformation chimique de composés nouveaux, provenant soit d'une hydrolyse partielle de produits plus complexes, soit au contraire d'une polymérisation artificielle de composés plus solubles : dans les deux cas, le résultat est faussé.

Or la soude diluée, encore fréquemment employée, n'échappe pas à ces deux inconvénients : d'abord elle extrait incomplètement les humates calciques si on ne procède pas à une décalcification préalable, méthode brutale qui ne semble pas devoir être recommandée. Inversement, lorsqu'elle agit sur certains horizons organiques peu évolués (A_0 d'humus brut, tourbe acide, par exemple), elle provoque une transformation, sans doute par un phénomène d'oxydation, de certaines substances présentes dans la matière végétale originelle et augmente artificiellement la quantité des composés humiques extraits ; plusieurs auteurs ont insisté sur cet inconvénient en particulier Scheffer et *al.* (1960) et plus récemment Von Buch (1962). Sauf cas particuliers, la soude diluée doit donc être proscrite en tant que réactif d'extraction valable.

Conscients de ces inconvénients de la soude, de nombreux auteurs ont fait appel à des solvants variés : sels alcalins, oxalate d'ammonium (Chaminade, 1946), fluorure de sodium (Manil, 1961), agents complexants du fer et du calcium tels que l'EDTA (Deuel et *al.*, 1960) et même solvants organiques (Scheffer et *al.*, 1960). Tous ces réactifs marquent un progrès très net sur la soude mais leur action est le plus souvent incomplète et surtout elle donne des résultats différents suivant les types d'humus, rendant ainsi les comparaisons inpossibles.

Les recherches récentes effectuées par de nombreux auteurs montrent la supériorité incontestable du *pyrophosphate de sodium* (en solution à 1 p. 100 ou 0,1 M) sur les autres réactifs d'extraction : ce réactif a été adopté en Grande-Bretagne par Coulson et *al.* (1959) et en URSS par Kononova et *al.* (1961) avec succès.

Ce réactif offre en effet un avantage majeur par rapport à tous les autres : il extrait, sinon la totalité, tout au moins la plus forte fraction possible des composés humiques, même ceux qui sont étroitement liés à la matière minérale, oxyde de fer, argiles ; cette efficacité maxima est due à ses propriétés : il provoque une dispersion parfaite des complexes argilo-humiques, même énergiquement floculés ; *il forme avec le calcium et le fer des sels insolubles, ce qui libère les acides humiques très polymérisés liés à ces deux cations,* et les solubilise sous forme d'humates alcalins. En particulier, toute décalcification préalable du sol est rendue inutile ; nous avons vérifié

qu'elle n'augmentait nullement la quantité d'acides humiques extraits de rendzines très calcaires.

Mais le pyrophosphate n'a pas que des avantages et en particulier sa forte alcalinité risque de provoquer des transformations ou des néogenèses, signalée à propos de la soude, quoique évidemment à un degré moindre : c'est un des points importants que nous nous sommes proposés d'élucider à l'aide des recherches exposées ci-dessous.

Nous constaterons effectivement que cette alcalinité excessive (pH supérieur à 9), conduit à une néogenèse, donc à une extraction trop forte de certains acides humiques, sur les horizons organiques acides (humus brut, tourbe acide.) C'est ce que montrent en particulier les extractions successives pratiquées par 100 cm^3 de pyrophosphate à 1 p. 100 sur 5 g de sol (1 g pour les horizons A_0 et T organiques) dont les résultats sont consignés dans le tableau 3 : on note une faible diminution de la quantité d'acides humiques extraits des horizons A_0 et T, au cours des trois extractions successives ; cette diminution est beaucoup plus rapide au contraire, donc normale, pour des sols à humus très évolué tels que le Ranker d'altitude, le Chernozem.

Les résultats des extractions successives pratiquées sur les humus peu évolués font immanquablement penser à une néoformation de composés humiques en cours d'extraction : ce processus, contrôlé par l'électrophorèse, sera discuté ultérieurement.

2) *Essais à l'aide de pyrophosphate additionné de* ClNa : *tentative de fractionnement des acides humiques*

Cette constatation nous a conduits à abaisser le pH de la solution de pyrophosphate par addition de ClNa (5 p. 100) qui, en présence d'humus, libère des ions H^+ par échange : pour A_0 et T le pH est ainsi abaissé à 7,5.

Les résultats ainsi obtenus sur ces humus peu évolués, seront discutés en détail, ultérieurement.

Pour les sols à humus peu évolué, donnant naissance à un complexe argilo-humique plus stable, ce même procédé, addition de sel ou pyrophosphate, nous a conduits à essayer de fractionner les acides humiques extraits en plusieurs catégories en fonction de leur polymérisation et de leur degré de liaison avec la matière minérale.

Rappelons, à ce propos, que cette tentative n'est pas nouvelle : de longue date, ont été distingués les acides hymatomélaniques (encore proches des acides fulviques et solubles dans l'acool), les acides humiques bruns (peu polymérisés) et les acides humiques gris (très polymérisés).

La méthode de fractionnement la plus valable, existant à ce jour, est sans contredit, celle de Tiurin (1951) qui distingue les acides fulviques libres, des acides fulviques combinés aux acides humiques : ces derniers sont eux-mêmes divisés en 3 fractions : 1) les acides humiques libres peu polymérisés, 2) les acides humiques liés aux argiles par le calcium, 3) les acides humiques liés aux argiles par les ions Fe et Al. Malheureusement cette méthode offre un inconvénient majeur : elle utilise la soude diluée comme réactif d'extraction ; nous en avons déjà souligné le défaut : par son effet oxydant elle augmente artificiellement la quantité d'acides humiques extraits ; cette méthode en particulier est inapplicable aux horizons peu humifiés, riches en matière organique fraîche.

La méthode que nous préconisons est basée sur le principe suivant : au cours des deux premières extractions, l'action du pyrophosphate est atténuée par l'addition de ClNa : seuls les composés les plus solubles, les acides fulviques et les acides humiques bruns peu polymérisés, sont ainsi extraits ; ensuite, le pyrophosphate est employé seul ce qui permet l'extraction des acides humiques gris plus polymérisés et plus intimement liés aux argiles, tout en supprimant ou au moins en atténuant le risque de polymérisation des composés les plus solubles, ceux-ci ayant été en grande partie éliminés. C'est, en somme l'application à l'extraction au pyrophosphate d'un procédé déjà essayé antérieurement par l'un de nous (DUCHAUFOUR, 1954) pour l'extraction à la soude.

On procède ainsi à 2 extractions à l'aide de pyrophosphate à 1 p. 100 additionné de 5 p. 100 ClNa, puis à 2 extractions au pyrophosphate seul ; dans chaque fraction ainsi obtenue on sépare les acides fulviques des acides humiques, en précipitant ces derniers à l'aide de SO_4H_2 ou HCl.

Le chlorure de sodium paraît jouer un double rôle : 1) il abaisse le pH par acidité d'échange et atténue l'effet de l'alcalinité du pyrophosphate ; 2) il flocule les argiles, emprisonnant ainsi les acides humiques plus condensés qui leur sont liés : ceux-ci ne sont alors libérés qu'au cours des 2 dernières extractions. La simple comparaison à l'œil des solutions d'extraction, après centrifugation, est significative : les solutions obtenues au cours des 2 premières extractions sont limpides et de couleur brun-rouge ; les solutions obtenues au cours des 2 dernières sont troubles (présence d'argile fine en suspension) et de couleur brun-noir.

Pour quelle raison se limiter à 4 extractions ? L'expérience nous a montré que si on met à part les horizons humiques peu évolués (humus brut, tourbes, etc., cas particulier dont nous discuterons à nouveau ultérieurement), la 5e extraction ne libère que des quantités négligeables de composés humiques, comparées à la somme des 4 premières (moins de 5 p. 100 du total). D'autre part, la quantité globale des composés humiques ainsi extraits est très semblable pour un sol donné à celle qui est extraite par 3 extractions successives au pyrophosphate employé seul (tabl. 3).

3) *Précipitation des acides humiques*

La séparation des acides fulviques et des acides humiques s'effectuent par adjonction d'un acide fort HCl ou SO_4H_2 qui précipite ces derniers. Deux questions se posent à ce sujet : l'une concernant le choix de l'acide, l'autre sa concentration.

La comparaison que nous avons effectuée entre les 2 acides HCl ou SO_4H_2 montre que les résultats varient peu : le taux d'acides humiques obtenus paraissant, dans certains cas, un peu plus élevé avec SO_4H_2.

Les différences sont plus marquées si on fait varier la concentration de l'acide : nous avons comparé l'action d'une concentration de 1 p. 100 avec la concentration habituellement adoptée de 10 p. 100 de SO_4H_2 (concentration finale de la solution d'extraction) : pour certains sols, les résultats varient peu (Chernozem, B des Podzols). Pour les autres, les variations sont plus fortes et on obtient une diminution de 10 p. 100 environ des acides humiques (avec le plus souvent une augmentation corrélative des acides fulviques) si la concentration de l'acide est abaissée à 1 p. 100

Or l'électrophorèse nous montre que la différence — en ce qui concerne les ex-

tractions 3 et 4 au pyrophosphate seul — porte presque exclusivement sur les acides humiques bruns peu polymérisés ; ceux-ci sont plus abondants par précipitation avec SO_4H_2 concentré à 10 p. 100 : or, nous verrons que la présence d'acides humiques bruns dans les extraits 3 et 4, est suspecte et paraît généralement provenir d'une néo-formation ; ceci nous paraît être une raison suffisante pour adopter la concentration de 1 p. 100 qui amène la solution d'extraction à un pH très voisin de 1.

Cette conclusion s'accorde avec celle des auteurs russes (KONONOVA et *al.*, 1961) qui emploient une concentration plus faible encore. Néanmoins, une concentration plus faible serait d'un usage aléatoire car elle donnerait un pH variable suivant les sols et obligerait à le mesurer à chaque dosage.

4) *Méthodes de dosage et expression des résultats*

On sait qu'il existe deux méthodes possibles de dosage des composés humiques extraits : l'une utilise la réduction de MnO_4K N/10 par ébullition d'une durée de 10 minutes, suivie d'un dosage du permanganate restant par l'intermédiaire d'une solution titrée d'acide oxalique ; l'autre fait appel au dosage du carbone à l'aide d'une méthode utilisant le mélange bichromate de potassium acide sulfurique, par exemple, la méthode ANNE (1945).

La première méthode est assez sensible et elle donne des résultats reproductibles ; mais la réduction n'étant qu'incomplète, la corrélation entre le permanganate réduit et le poids d'acides humiques est variable suivant les humus et difficile à établir de façon certaine : la valeur de 1 mg couramment adoptée n'est qu'une moyenne assez grossière.

La seconde méthode présente des avantages évidents : les résultats sont exprimés en *carbone*, et la réduction étant meilleure, la corrélation entre le carbone dosé et le volume de solution titrée (en l'espèce le sel de Mohr 0,2 N, servant à doser l'excès de bichromate non réduit) peut être établi de manière suffisamment rigoureuse.

De plus l'avantage d'obtenir les résultats en carbone est évident : il permet d'additionner les carbones des divers composés extraits (fulviques et humiques) et en les comparant au carbone total du sol d'obtenir un *taux d'humification* valable. Malheureusement cette seconde méthode devient très imprécise lorsqu'elle est appliquée à des extraits liquides nécessairement dilués et cela d'autant plus qu'il s'agit d'extractions fractionnées. En outre si ClNa réduit peu le permanganate en milieu neutre ou alcalin (ce qui permet le dosage des acides fulviques, à condition de faire un témoin à blanc), il réduit fortement le bichromate par dégagement de HCl en milieu acide et à chaud ; la méthode ne peut donc être utilisée pour les solutions d'acides fulviques contenant ClNa.

Dans ces conditions, nous avons procédé de la façon suivante : nous avons adopté la méthode au permanganate en établissant à l'avance pour les divers types d'humus étudiés *la correspondance entre le poids de carbone et le volume du* MnO_4K N/10 *réduit*, cela pour les acides humiques et les acides fulviques : cette correspondance a été établie en utilisant concurremment les 2 méthodes sur deux fractions égales d'une même solution suffisamment concentrée : il fallait alors augmenter la précision de la méthode ANNE, d'une part en opérant sur des solutions très concentrées (pratiquement obtenues à l'aide d'une seule extraction au pyrophosphate sur un poids assez élevé de sol),

d'autre part, en modifiant la méthode ANNE elle-même suivant une technique qu'on trouvera en annexe. Bien entendu, pour avoir des résultats sûrs, plusieurs répétitions étaient nécessaires.

La correspondance ainsi obtenue, exprimée en mg de carbone d'acides fulvique ou humique pour 1 cc de MnO_4K N/10 est en même temps une valeur très importante pour caractériser les humus : nous reviendrons sur ce point dans le dernier chapitre à propos de l'interprétation d'ensemble des résultats obtenus.

Dans cette étude nous ne donnerons pas en détail les résultats des nombreuses mesures effectuées, mais seulement les valeurs moyennes que nous avons déduites de cet ensemble de résultats (tabl. 2). Bornons-nous à signaler que le pouvoir réducteur caractérise mieux les acides humiques, pour un type de sol donné, que les acides fulviques, pour lesquels il semble plus difficile de dégager une loi. En principe le pouvoir réducteur des acides humiques varie en raison inverse du degré de polymérisation. Celui des acides fulviques varie de façon parallèle pour les divers sols, mais avec des écarts plus marqués. Néanmoins, il ne faut pas se dissimuler que ce procédé ne conduit encore qu'à une approximation qui nous paraît cependant plus précise et plus valable que la correspondance arbitraire souvent utilisée de 1 mg d'acide humique par cm^3 de MnO_4K.

TABLEAU 2

Correspondance permanganate N/10 *et Carbone*
(en mg C par cm^3 MnO_4K, moyennes)

	Acides fulviques	Acides humiques
Tourbe non évoluée	0,50	0,40
Horizon A_0 (Mor et Tourbe)	0,50	0,50
Horizon B (Podzol)	0,50	0,50
Mull-Horizon A_1	0,60	0,55
Rendzine-Mull calcique, surface	0,60	0,55
Rendzine-Mull calcique, profondeur	0,60	0,65
Moder (sol ocre podzolique)	0,70	0,65
Anmoor	0,70	0,65
Chernozem	0,90	0,65
Moder pseudo-alpin	0,90	0,75

Il subsiste encore une difficulté concernant le dosage des acides humiques obtenus par les 4e et 5e extractions, car comme nous l'avons signalé, les solutions sont fréquemment troubles ; elles contiennent une certaine quantité d'argile dispersée par le pyrophosphate ; le dosage volumétrique est ainsi rendu difficile et la présence de ces argiles très fines semble fausser le résultat. Ceci peut être montré par l'expérience suivante : la solution sodique trouble d'une 4e extraction est séparée en 2 fractions égales ; le dosage au MnO_4K est effectué sur l'une directement, sur l'autre après floculation des argiles par 1 p. 100 NaCl en cristaux : le volume de MnO_4K réduit est diminué d'environ moitié dans le 2e cas ; or le floculat d'argile, isolé et traité par une solution de soude diluée ne libère que des traces de matière organique : c'est donc bien la fraction argileuse qui est réductrice, peut-être parce qu'elle emprisonne un peu de matière organique rendue ainsi réfractaire à toute solubilisation ultérieure par les solutions alcalines.

II — Méthode d'électrophorèse sur papier

Plusieurs auteurs (Scheffer et *al.*, 1959 — Kononova, 1961 — Coulson et *al.*, 1959) ont utilisé avec succès l'électrophorèse sur papier, en vue du fractionnement des composés humiques. Nous l'avons appliquée ici aux seuls acides humiques : la méthode utilisée est celle qui a été mise au point par l'un de nous (Jacquin, 1961) en vue de fractionner les acides humiques extraits globalement à l'aide de la soude diluée ; elle a été ici adaptée à l'extraction fractionnée au pyrophosphate, l'électrophorèse pratiquée sur les 4 fractions obtenues par voie chimique, permettant une séparation plus complète et une identification plus précise des constituants qu'une électrophorèse globale.

En outre, cette méthode nous a permis d'utiles comparaisons :

1) entre l'extraction directe au pyrophosphate à 1 p. 100 et l'extraction fractionnée en utilisant ClNa, 2) entre l'extraction au pyrophosphate et l'extraction à la soude, 3) entre les acides humiques obtenus par précipitation à 10 p. 100 et 1 p. 100 SO_4H_2 : ce dernier point ayant été déjà discuté dans le paragraphe précédent, nous n'y reviendrons pas.

1) *Mise au point de la méthode*

La seule difficulté consiste à obtenir une solution des acides humiques dans la soude, aussi concentrée que possible, mais en évitant toute insolubilisation partielle provoquant la formation de granulations nuisant à la migration.

Les acides humiques, destinés à l'étude par électrophorèse, doivent être précipités par HCl 1 p. 100 de préférence à SO_4H_2 1 p. 100 ; en effet, une insuffisance de lavage laissant des ions SO_4 dans la solution gêne la migration ; d'autre part l'acide chlorhydrique étant volatil s'élimine plus facilement. Nous avons par ailleurs vérifié que les électrophorégrammes obtenus étaient sensiblement identiques, que l'on emploie l'un ou l'autre acide.

Les acides humiques précipités et lavés par HCl N/10 puis à l'eau, sont centrifugés et redissous dans NaOH N; il convient d'employer la quantité minimum indispensable pour obtenir une solution sirupeuse exempte de toute granulation : un certain tâtonnement au début, est nécessaire pour obtenir la concentration optima.

Cette concentration n'est donc pas rigoureusement constante pour les divers extraits humiques et nous avons vérifié que cela n'avait pas d'incidence sur le résultat final : sans doute l'intensité de la teinte générale des électrophorégrammes obtenus à l'aide de concentrations de 10 p. 100, 5 p. 100 ou 2,5 p. 100 d'acides humiques, est d'autant plus faible que la dilution est plus grande ; mais la proportion relative des différentes fractions ne s'en trouve pas affectée et c'est là le point important.

Les électrophorégrammes sur papier sont obtenus, en milieu tamponné à pH7,4, sous une tension de 200 volts pendant 3 heures ; la migration a lieu vers l'anode ; le détail de la méthode est indiqué en annexe.

2) *Fractionnement des acides humiques par électrophorèse*

L'examen des électrophorégrammes, même superficiel, montre immédiatement la formation de bandes colorées à des distances sensiblement constantes de la zone de

dépose (fig. 1 à 4) ; ces bandes sont tantôt nettes, tantôt plus diffuses ; elles caractérisent donc le pouvoir migrateur dans un champ électrique, la « mobilité » des acides humiques : l'importance de la migration paraît conditionnée essentiellement par le degré de polymérisation, donc la grosseur des molécules ; ainsi, des horizons A_0 des podzols, on n'extrait guère que des acides humiques « bruns », dont la migration est maxima ; alors que les acides humiques des Chernozems appartiennent essentiellement à la catégorie des gris : ils sont plus foncés et leur migration est presque nulle (JACQUIN, 1961) ; or on sait que les acides humiques des Chernozems sont plus polymérisés que ceux des horizons A_0.

D'autre part, l'intensité de coloration des bandes, leur « densité optique » mesurée par transparence sur les électrophorégrammes, permet d'effectuer une évaluation quantitative de la proportion des 3 catégories d'acides humiques que nous serons appelés à distinguer dans chaque électrophorégramme : à l'aide du densitomètre ZEISS, il a été possible d'établir des courbes de densité optique pour les électrophorégrammes correspondant à chacune des extractions chimiques (fig. 5 à 7). L'évaluation des surfaces délimitées par les secteurs correspondant aux bandes colorées, permet d'évaluer la proportion des différents acides humiques ainsi séparés.

Le problème de la délimitation des surfaces correspondant aux 3 catégories d'acides humiques que nous distinguerons peut se résoudre de 2 manières : on peut adopter des coordonnées fixes pour tous les électrophorégrammes obtenus, ou au contraire tenir compte de l'allure générale des courbes ; en effet, les maximum correspondant à une fraction donnée ne se trouvent pas rigoureusement à la même distance de l'origine, ces légères variations paraissant liées à l'ancienneté de la solution tampon ; c'est la deuxième méthode, plus souple, qui a été adoptée.

L'examen comparatif des électrophorégrammes de même que les courbes de densité optique montre très nettement 3 catégories fondamentales d'acides humiques, classés en fonction de leur pouvoir migrateur : les bruns, très mobiles, de couleur assez claire, désignés par la lettre B ; les gris, plus foncés, non ou peu mobiles, désignés par G ; entre les deux, une catégorie intermédiaire donnant lieu à une migration diffuse et limitée (I).

Acides humiques B : « bruns », les plus mobiles, et les moins polymérisés ; formant une bande diffuse à 11 cm environ de la dépose.

Acides humiques I : intermédiaire, de couleur variable, souvent plus foncés que les précédents ; migration plus étalée, plus diffuse que dans le cas précédent, mais donnant lieu à un maximum en général bien visible à 5 ou 6 cm de la dépose. Cette forme intermédiaire se divise elle-même très nettement en 2 catégories : l'une apparentée aux *bruns* par sa couleur (I_b), caractérise la plupart des sols ; l'autre beaucoup plus foncée, est au contraire voisine des *gris* (I_g) ; elle se rencontre uniquement dans les extractions 3 et 4 des humus évolués ou très polymérisés (Anmoor fossile Chernozem, Moder d'altitude).

Acides humiques G : « gris », très polymérisés, non ou peu mobiles, migration faible ou nulle : dans la plupart des cas, la bande de dépose reste nette, garde sa couleur foncée et s'élargit seulement par une diffusion très limitée et très progressive vers l'anode ; elle donne lieu à un « pic » caractérisé, sur la courbe de densité optique. Signalons que leur couleur tout en étant toujours très foncée est variable suivant les sols : brune dans les Mull, brun-noir dans les Rendzines, les Rankers, franchement noire dans les Chernozems, les Anmoor ; dans cette étude préliminaire, nous n'avons

pas tenu compte de ce caractère de couleur évidemment impossible à apprécier de façon quantitative.

Il existe une forme particulière d'acides humiques gris, que nous désignons par G_{ch} et qui est spéciale aux humus très fortement polymérisés (Chernozems, Anmoor fossile et à un degré moindre : Moder d'altitude). Cette forme est isolée de manière dominante par l'extraction n° 3 (1re extraction au pyrophosphate seul) pratiquée sur ces sols ; elle a été obtenue à chaque tentative d'extraction, renouvelée de nombreuses fois : ces acides humiques, gris foncé, diffusent de part et d'autre de la ligne de dépose (vers la cathode aussi bien que vers l'anode), en donnant une bande irrégulière ; une partie migre à une courte distance (environ 1 cm) vers l'anode en donnant une seconde bande foncée diffuse et irrégulière (cf. fig. 3, extraction 3). Cette variété d'acides gris a été confondue avec l'autre, dans l'évaluation quantitative.

B — DISCUSSION : EFFICACITÉ DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION CHIMIQUE

Nous avons consigné l'essentiel des résultats obtenus dans 4 tableaux : le tableau 3 donne les résultats en carbone, de l'extraction directe, sur quelques-uns des sols étudiés, en particulier ceux qui sont riches en matière organique peu évoluée (A_0 et T), les autres n'étant donnés que comme base de comparaison ; on a procédé à 3 extractions successives à l'aide de pyrophosphate à 1 p. 100.

Le tableau 4 indique les chiffres obtenus par extraction fractionnée sur tous les sols étudiés ; sur le tableau 5, sont portés les résultats de l'électrophorèse, en p. 100 par fractions, d'abord et ensuite, en appliquant ces pourcentages aux valeurs obtenues par extraction chimique (donc celles données par le tableau 4). La dernière colonne indique le p. 100 global des 3 catégories d'acides humiques. Enfin le tableau 6 est un tableau récapitulatif des données obtenues pour chaque humus : il comporte le rapport acides fulviques/acides humiques, et le taux d'humification par comparaison avec le carbone total. Pour certains sols, nous avons en outre calculé un « taux d'humification rectifié » en tenant compte des deux premières extractions seulement, celles effectuées en présence de ClNa.

I — Influence de l'alcalinite du solvant sur l'extraction des composés humiques

Nous avons souligné dans le paragraphe précédent les dangers de l'alcalinité lorsque le réactif d'extraction agit sur une matière organique peu évoluée, riche en débris végétaux incomplètement transformés : la faible décroissance de valeurs obtenues au cours d'extractions successives au pyrophosphate seul (tableau 3) a été signalée à cette occasion. Pour deux des humus en question (P_1A_0 et TA_0), il a été en outre procédé à 7 extractions successives à l'aide de pyrophosphate à 1 p. 100, la durée de la mise en contact avec le solvant ayant été augmentée à la 6e extraction ; les chiffres obtenus montrent une faible décroissance de la quantité d'acides humiques

extraits de la 1re à la 5e, une augmentation marquée par contre pour la 6e extraction :

Acides humiques en C % — Extractions :	1	2	3	4	5	6	7
P_1A_0	1,55	0,59	0,44	0,22	0,21	0,72	0,27
TA_0	2,27	0,97	0,69	0,36	0,29	0,83	0,29

Cette observation rejoint celle de Von Buch (1962) qui a noté, en s'appuyant sur une autre méthode de contrôle, une augmentation comparable des acides humiques extraits d'une matière organique peu évoluée, lors d'une série d'extractions successives au pyrophosphate : elle prouve très nettement qu'un contact prolongé avec le solvant augmente de manière purement artificielle la quantité d'acides humiques extraite.

Tableau 3

Extractions globales des acides fulviques et humiques

Sols	Horizon	Acides fulviques C %				Acides humiques C %			
		Pyrophosphate 1 %			Σ	Pyrophosphate 1 %			Σ
		1	2	3		1	2	3	
P_1	A_0	0,45	0,32	0,27	1,04	1,50	0,91	0,57	2,98
	B_1	1,03	0,08	0,02	1,13	1,20	0,12	0,04	1,36
P_2	A_0	0,32	0,20	0,15	0,67	0,60	0,30	0,16	1,06
Rk_1	A_1	2,47	0,49	0,37	3,33	2,90	0,62	0,18	3,70
Rk_2	A	1,50	0,36	0,23	2,09	1,88	0,47	0,20	2,55
R_1	A_1	0,38	0,16	0,08	0,62	0,31	0,24	0,15	0,70
	A(C)	0,22	0,06	0,03	0,31	0,24	0,14	0,05	0,43
Ch_1	A_1	0,04	0,02	0,01	0,07	0,33	0,10	0,04	0,47
An_2		0,36	0,20	0,11	0,67	0,46	0,47	0,25	1,18
An_3		1,01	0,43	0,11	1,55	2,29	0,78	0,25	3,32
T	A_0	0,45	0,24	0,18	0,87	2,28	1,52	0,93	4,73
	T	0,38	0,22	0,19	0,79	0,66	0,49	0,30	1,45

Or l'électrophorèse donne des résultats très caractéristiques et qu'il est possible de résumer d'une manière très simple : pour ce type de matière organique, *quel que soit le mode d'extraction, fractionnée ou non, et quels que soient les numéros d'ordre de*

l'extrait obtenu, les électrophorégrammes sont sensiblement identiques : (fig. 5) *les acides humiques gris G sont à peu près inexistants, les acides humiques bruns B dominent de beaucoup* ; en ce qui concerne les extractions fractionnées, la proportion des bruns les plus mobiles augmente même nettement, lors des 2 dernières extractions pour lesquelles l'alcalinité du milieu augmente.

Pour les acides fulviques, on peut faire une constatation analogue ; ils sont relativement solubles et devraient être normalement éliminés, en grande majorité, par les 2 premières extractions effectuées en présence de ClNa ; or, ils sont encore extraits en proportion notable, anormalement élevée lors des 2 dernières extractions.

Ces sols à matière organique peu évoluée, s'opposent, à ce double point de vue, aux humus évolués à complexe argilo-humique bien formé ; les électrophorégrammes de ces sols sont très différents suivant qu'il s'agit de ceux correspondant aux deux premières extractions (les bruns l'emportent), ou aux deux dernières : les gris sont alors nettement dominants (fig. 6 et 7). Toutefois la séparation des bruns et des gris n'est pas parfaite, nous y reviendrons ; et pour ces sols aussi il semble qu'il y ait une certaine néoformation de bruns au cours des extractions 3 et 4 ; mais la quantité d'acides humiques bruns ainsi produite est faible et n'influence pas notablement le « taux d'humification ». En ce qui concerne les acides fulviques on note que la quantité extraite au cours des 2 dernières extractions 3 et 4 est très réduite pour ces sols, relativement beaucoup plus que pour les humus peu évolués.

Afin de vérifier que l'influence de l'alcalinité du réactif d'extraction existe même sur des humus évolués, nous avons procédé à l'essai suivant : nous avons soumis une rendzine et un chernozem, préalablement épuisés en composés humiques par les 4 extractions habituelles, à une cinquième extraction, effectuée celle-ci à l'aide de soude N/10 : on extrait encore par cette opération une quantité d'acides humiques à peine inférieure à celle obtenue en 4, mais l'électrophorégramme en diffère totalement : alors qu'en 4, les gris l'emportent et les bruns sont fortement minoritaires, c'est l'inverse en 5 : pour la rendzine les bruns passent de 27 p. 100 (extraction 4 au pyro) à 53 p. 100 (extraction 5, à NaOH) ; pour le chernozem, ils s'élèvent de 2 p. 100 (extraction 4) à 33 p. 100 (extraction 5). Il paraît évident que les acides humiques bruns extraits au cours de cette 5e extraction, résultent d'une néoformation qu'on doit attribuer à la forte alcalinité de la soude.

Si l'on constate une néoformation d'acides humiques bruns, au cours des extractions au pyrophosphate de sodium, il n'en reste pas moins qu'elle est beaucoup plus importante pour les humus peu évolués, au point qu'elle fausse toute tentative de fractionnement ; pour ces humus, l'abaissement du pH de la solution d'extraction par addition de ClNa s'impose donc ; mais l'acidité d'échange du mélange sol-réactif finalement obtenue, est évidemment fonction du rapport du poids de la prise d'essai au volume du réactif utilisé. Pour bien faire, il faudrait opérer à pH constant ; pour nos essais, nous nous sommes bornés à opérer sur 1 g de sol s'il contient plus de 20 p. 100 de matière organique, sur 5 g s'il contient moins de 20 p. 100 ; on note que la somme des acides humiques extraits par 2 extractions successives en présence de ClNa, est *toujours beaucoup plus faible que la quantité extraite par une seule extraction au pyrophosphate ;* on peut penser qu'on a, par ce procédé, diminué considérablement la néoformation artificielle d'acides humiques bruns due à l'alcalinité.

PLANCHE I

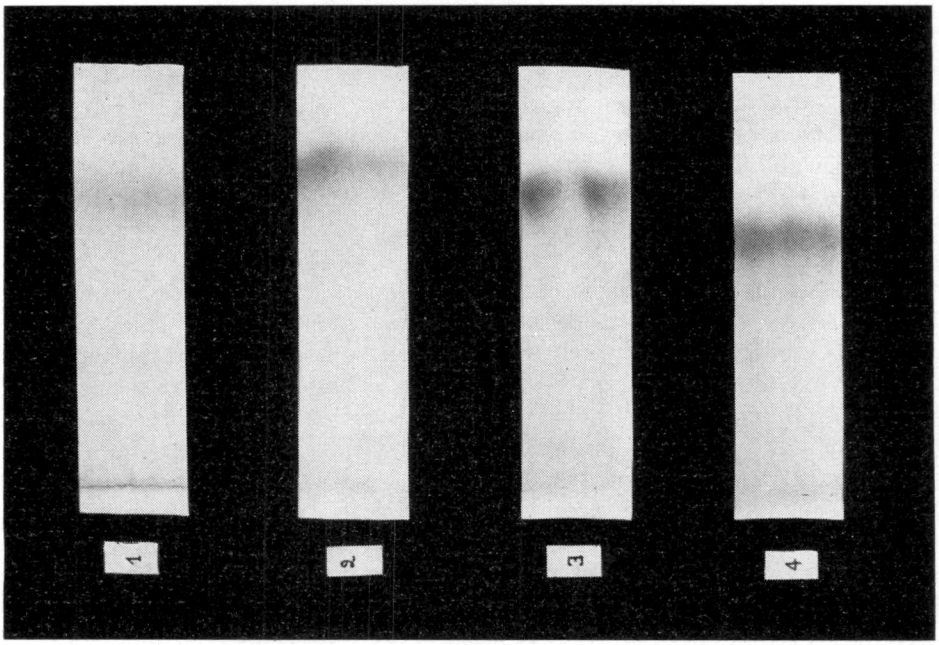


FIG. 1. — *Électrophorégrammes des acides humiques de la Tourbe acide Aö*
4 extractions : Fractionnement chimique impossible

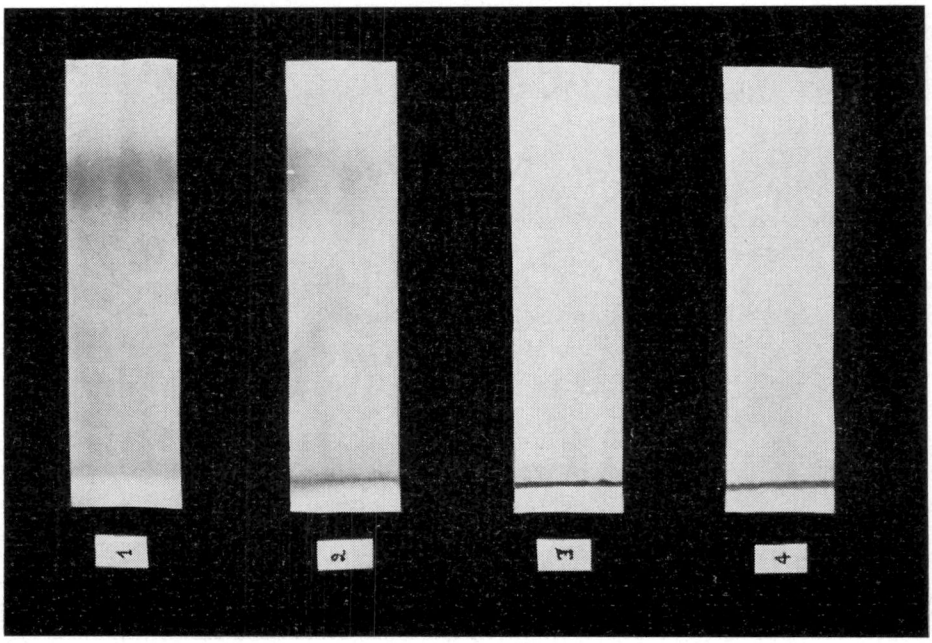


FIG. 2. — *Électrophorégrammes des acides humiques du Podzol* 1 B_1
4 extractions : Fractionnement chimique satisfaisant

PLANCHE II

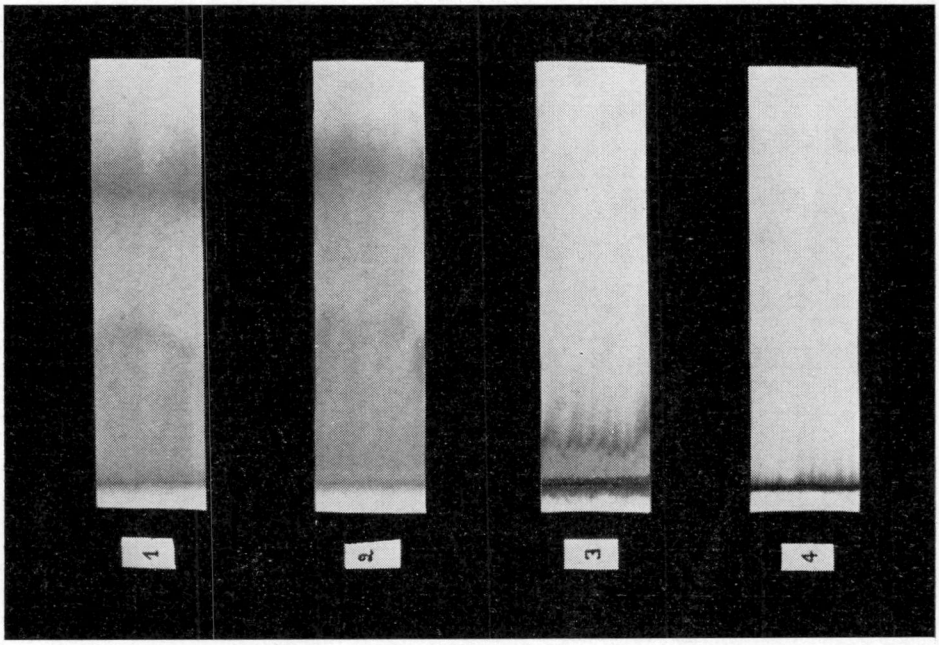


FIG. 3. — *Électrophorégrammes des acides humiques du Chernozem 4 extractions : Très bon fractionnement chimique*

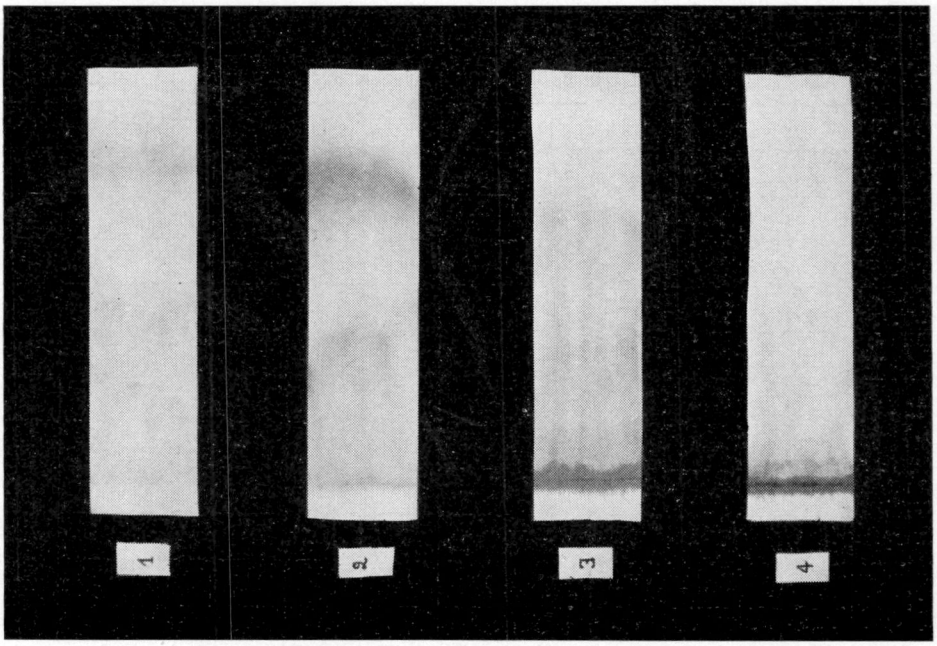


FIG. 4. — *Électrophorégrammes des acides humiques de l'Anmoor calcique fossile (An_1) surface. Fractionnement chimique satisfaisant*

TABLEAU 4

Extractions fractionnées des acides fulviques et humiques

Sols	Horizon	Acides fulviques C %					Acides humiques C %				
		Pyro + ClNa		Pyro		Σ	Pyro + ClNa		Pyro		Σ
		1	2	3	4		1	2	3	4	
P_1	A_0	0,48	0,36	0,27	0,32	1,43	0,76	0,50	0,82	0,99	3,07
	B_1	0,76	0,18	0,07	0,03	1,04	1,45	0,18	0,23	0,10	1,96
P_2	A_0	0,30	0,12	0,10	0,18	0,70	0,29	0,10	0,15	0,18	0,72
	B_1	0,46	0,06	0,02	0,00	0,54	1,30	0,07	0,13	0,05	1,55
OP	A_1	0,83	0,11	0,09	0,05	1,08	1,20	0,20	0,32	0,26	1,98
	(B)	1,50	0,23	0,13	0,06	1,92	0,61	0,06	0,18	0,10	0,95
Rk_1	A_1	3,37	1,26	0,23	0,24	5,10	2,06	0,16	0,75	0,36	3,33
	A'_1	1,26	0,21	0,14	0,12	1,73	0,83	0,09	0,43	0,18	1,53
Rk_2	A	1,50	0,28	0,22	0,12	2,12	1,20	0,15	0,67	0,29	2,31
Br_1	A_1	0,36	0,12	0,08	0,06	0,62	0,10	0,07	0,11	0,09	0,37
Br_2	A_1	0,32	0,14	0,08	0,08	0,62	0,31	0,10	0,17	0,21	0,79
R_1	A_1	0,35	0,20	0,13	0,08	0,76	0,11	0,10	0,24	0,14	0,59
	A(C)	0,29	0,06	0,05	0,02	0,42	0,07	0,03	0,16	0,06	0,32
R_2	A_1	0,26	0,22	0,08	0,10	0,66	0,08	0,08	0,19	0,24	0,59
	A(C)	0,25	0,13	0,10	0,10	0,58	0,09	0,08	0,26	0,25	0,68
Ch_1	A_1	0,14	0,05	0,03	0,01	0,23	0,05	0,03	0,26	0,06	0,40
Ch_2	A_1	0,23	0,05	0,01	0,00	0,29	0,07	0,05	0,80	0,16	1,08
An_1	A_1	0,32	0,24	0,08	0,05	0,69	0,07	0,07	0,68	0,22	1,04
	A'_1	0,25	0,08	0,04	0,01	0,38	0,02	0,03	0,98	0,21	1,24
An_2		0,41	0,25	0,12	0,08	0,90	0,16	0,19	0,28	0,18	0,81
An_3	A_1	0,90	0,25	0,17	0,05	1,37	1,66	0,50	0,52	0,28	2,96
T	T_{A0}	0,73	0,39	0,24	0,18	1,54	0,71	0,49	1,80	0,90	3,90
	T	0,56	0,25	0,25	0,30	1,36	0,12	0,13	0,47	0,31	1,03

On peut donc conclure que l'alcalinité du réactif d'extraction favorise la néoformation d'acides humiques bruns, peu polymérisés, et d'acides fulviques ; cette néoformation est d'autant plus accentuée que le sol est plus riche en matière organique fraîche, peu transformée : il convient alors d'abaisser le pH du réactif d'extraction (par addition de ClNa dans notre méthode).

L'alcalinité agit dans le même sens sur un complexe argilo-humique évolué, mais de façon plus modérée ; elle ne modifie que faiblement le « taux d'humification », à l'inverse du premier cas ; sur ces derniers humus, l'alcalinité du pyrophosphate paraît même indispensable à l'extraction complète des acides humiques gris les plus polymérisés.

II — Efficacité de l'extraction fractionnée

Les considérations précédentes nous permettent de prévoir que la méthode proposée se sera pas applicable aux humus peu évolués : Tourbes, humus bruts, certains Anmoors ; il y a à cela plusieurs raisons : la principale étant la néoformation

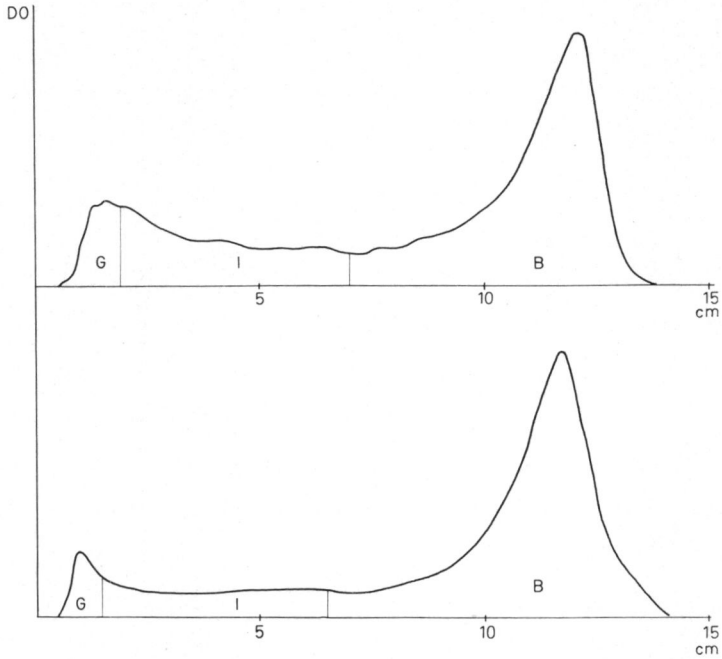


Fig. 5. — *Electrophorégrammes des acides humiques de Podzol A_0*
Extraction 1 (en bas) et 3 (en haut) fractionnement chimique impossible

d'acides humiques bruns et d'acides fulviques quand le pH augmente ; mais on peut invoquer aussi l'absence de liaison entre la matière organique et la matière minérale — qui joue un grand rôle dans le processus de fractionnement — la faible proportion des acides humiques gris, etc. Les électrophorégrammes sensiblement identiques pour les 4 extractions successives d'un même sol confirment ces prévisions : c'est ce

qu'illustrent bien les figures 1 (photos des électrophorégrammes d'un A_0) et 5 (diagrammes de densité optique).

Parmi les sols étudiés nous pouvons ranger dans cette catégorie, les horizons

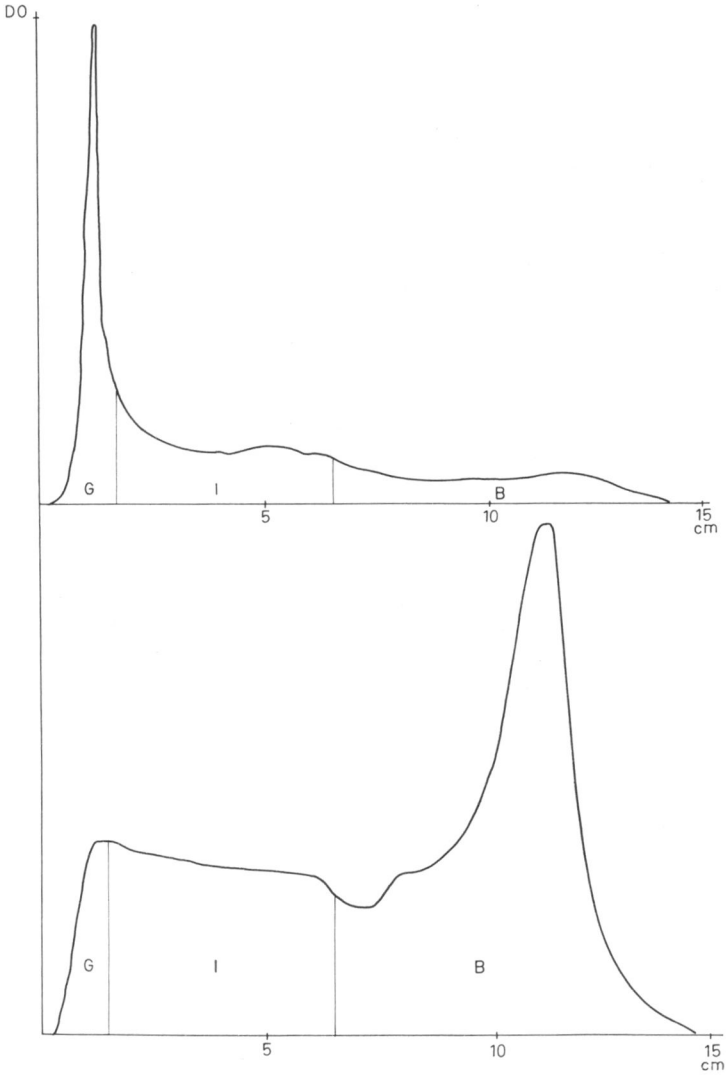


FIG. 6. — *Electrophorégrammes des acides humiques de Podzol B 1 — Extraction 1 (en bas) et 3 (en haut) Fractionnement chimique valable*

d'humus brut, les Tourbes, l'Anmoor calcique tourbeux et même l'Anmoor acide.

Pour les autres sols, à humus plus évolués, les résultats obtenus sont bien meilleurs sans toutefois être parfaits : en principe la majorité des bruns sont libérés par les extractions 1 et 2 (pyrophosphate + ClNa), les gris étant solubilisés seulement par les extractions 3 et 4 (pyrophosphate seul). Les intermédiaires sont extraits en majorité en 1 et 2, dans la plupart des sols (ils sont alors de couleur brune I_B), en 3 et 4 au

contraire dans quelques-uns : Chernozem, Anmoor fossile, Rendzine (il s'agit alors d'intermédiaires plus foncés, voisins des gris I_G). Les photos des figures 2, 3 et 4 et les graphiques de densité optique des figures 6 et 7 montrent nettement cette opposition

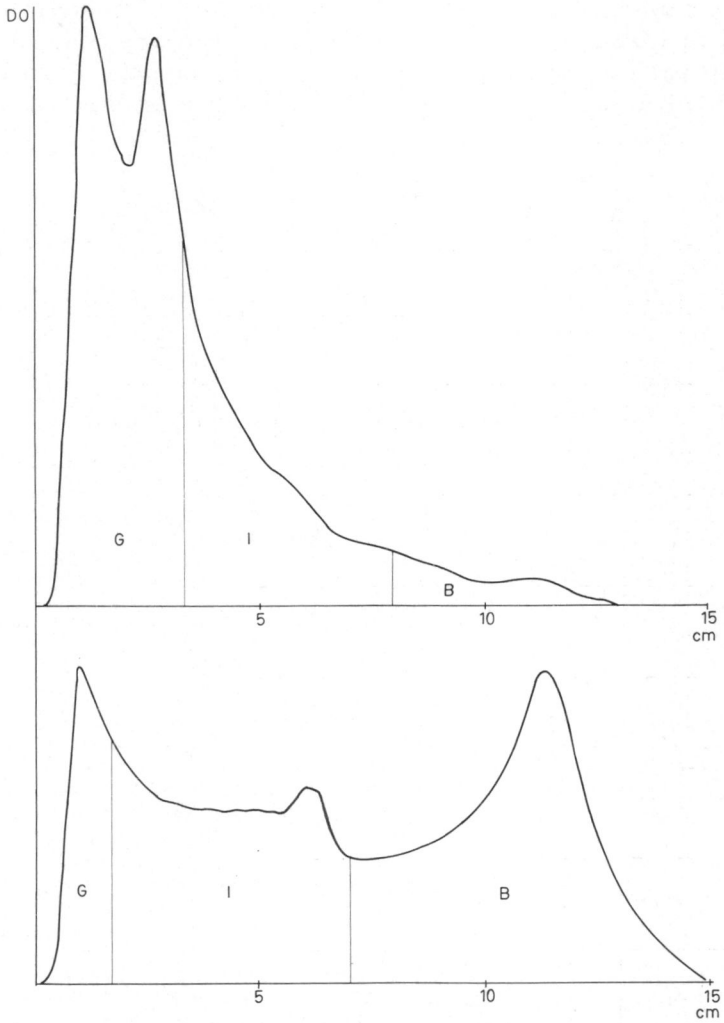


FIG. 7. — *Electrophorégrammes des acides humiques de chernozem (2). Extraction 1 (en bas) et 3 (haut) : très bon fractionnement*

des électrophorégrammes, de même que les pourcentages obtenus par la méthode des densités optiques et qui figurent sur le tableau 5.

Les chiffres en carbone, portés sur le même tableau, sont moins spectaculaires que les pourcentages pour chaque extraction ; on notera, et ceci s'explique facilement, que la fraction majoritaire dans un type d'humus donné se répartit de façon plus satisfaisante dans les extraits, que la fraction minoritaire ; ainsi, si les bruns sont très abondants dans l'humus traité, une fraction des gris est entraînée avec eux dès

les premières extractions, c'est l'inverse si les gris l'emportent de beaucoup dans l'échantillon.

Cette remarque faite, on constate que le fractionnement des gris est dans l'ensemble meilleur que celui des bruns ; presque toujours en effet, on note pour ces derniers la présence d'une fraction minoritaire assez élevée en 3 et 4 ; souvent même ils se répartissent en 2 fractions à peu près égales dans les deux séries 1 et 2 d'une part, 3 et 4 d'autre part. Ceci semble dû au phénomène de néoformation en milieu alcalin étudié dans le paragraphe précédent ; cette néoformation est manifestement plus

TABLEAU 5

Fractionnement des acides humiques par électrophorèse

Sols	Horizon	Catégorie AH	% par fractions				En C par fractions				Σ	En % des AH
			1	2	3	4	1	2	3	4		
P_1	A_0	B	78,8	76,7	66,1	63,6	0,60	0,38	0,54	0,63	2,15	70,0
		I	15,8	17,1	25,7	29,3	0,12	0,09	0,21	0,29	0,71	23,1
		G	5,4	6,2	8,2	7,1	0,04	0,03	0,07	0,07	0,21	6,9
	B_1	B	59,9	56,0	25,4	28,9	0,87	0,10	0,06	0,03	1,06	54,1
		I	33,9	34,5	42,8	36,1	0,49	0,06	0,10	0,04	0,69	35,2
		G	6,2	9,5	31,8	35,0	0,09	0,02	0,06	0,04	0,21	10,7
P_2	A_0	B	54,9	36,8	45,1	49,4	0,16	0,04	0,07	0,09	0,36	50,0
		I	37,1	46,6	41,0	36,2	0,11	0,05	0,06	0,06	0,28	38,9
		G	8,0	16,6	13,9	14,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08	11,1
	B_1	B	55,9	46,2	21,2	25,6	0,73	0,03	0,03	0,01	0,80	51,6
		I	37,0	41,2	40,2	39,2	0,48	0,03	0,05	0,02	0,58	37,4
		G	7,1	12,6	38 6	35,2	0,09	0,01	0,05	0,02	0,17	11,0
OP	A_1	B	58,3	50,5	30,6	23,0	0,70	0,10	0,10	0,06	0,96	48,5
		I	33,5	39,3	39,9	43,0	0,40	0,08	0,13	0,11	0,72	36,4
		G	8,2	10,2	29,5	34,0	0,10	0,02	0,09	0,09	0,30	15,1
	B	B	43,0	50,6	24,0	32,3	0,26	0,03	0,04	0,03	0,36	37,9
		I	45,5	37,0	43,4	38,7	0,28	0,02	0,08	0,04	0,42	44,2
		G	11,5	12,4	32,6	29,0	0,07	0,01	0,06	0,03	0,17	17,9
Rk_1	A_1	B	59,1	33,8	29,8	33,7	1,22	0,05	0,22	0,12	1,61	48,4
		I	34,9	50,4	37,0	36,5	0,72	0,08	0,28	0,13	1,21	36,3
		G	6,0	15,8	33,2	29,8	0,12	0,03	0,25	0,11	0,51	15,3
	A'_1	B	42,5	43,6	18,3	17,8	0,35	0,04	0,08	0,03	0,50	32,7
		I	48,9	43,9	59,0	46,7	0,41	0,04	0,25	0,09	0,79	51,6
		G	8,6	12,5	22,7	35,5	0,07	0,01	0,10	0,06	0,24	15,7
Rk_2	A	B	52,5	42,0	15,7	20,6	0,63	0,06	0,11	0,06	0,86	37,2
		I	36,1	34,7	35,0	37,1	0,43	0,05	0,23	0,11	0,82	35,5
		G	11,4	23,3	49,3	42,3	0,14	0,04	0,33	0,12	0,63	27,3
Br_1	A_1	B	68,8	70,9	34,2	25,2	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	48,7
		I	22,0	21,5	42,8	41,5	0,02	0,01	0,05	0,04	0,12	32,4
		G	9,2	7,6	23,0	33,3	0,01	0,00	0,03	0,03	0,07	18,9

TABLEAU 5 *(suite)*

Fractionnement des acides humiques par électrophorèse

Sols	Horizon	Catégorie AH	% par fractions				En C par fractions				Σ	En % des AH
			1	2	3	4	1	2	3	4		
Br_2	A_1	B	64,7	56,0	36,8	47,5	0,20	0,06	0,06	0,10	0,42	53,2
		I	27,0	29,7	29,8	26,3	0,08	0,03	0,05	0,06	0,22	27,8
		G	8,3	14,3	33,4	26,2	0,03	0,01	0,06	0,05	0,15	19,0
R_1	A_1	B	57,9	53,5	42,0	37,7	0,06	0,05	0,10	0,05	0,26	44,1
		I	31,1	37,2	35,4	34,2	0,04	0,04	0,09	0,05	0,22	37,3
		G	11,0	9,3	22,6	28,1	0,01	0,01	0,05	0,04	0,11	18,6
	A(C)	B	51,0	44,6	28,4	14,9	0,04	0,01	0,04	0,01	0,10	31,3
		I	35,5	44,3	27,3	49,3	0,03	0,01	0,05	0,03	0,12	37,5
		G	15,5	11,1	44,3	35,8	0,01	0,00	0,07	0,02	0,10	31,2
R_2	A_1	B	59,9	57,3	27,0	39,6	0,05	0,05	0,05	0,09	0,24	40,7
		I	31,8	31,5	39,3	34,1	0,03	0,03	0,07	0,08	0,21	35,6
		G	8,3	11,2	33,7	26,3	0,01	0,01	0,06	0,06	0,14	23,7
	A(C)	B	53,6	56,1	23,4	25,2	0,05	0,05	0,06	0,06	0,22	32,4
		I	41,0	36,8	41,8	41,5	0,04	0,03	0,11	0,10	0,28	41,2
		G	5,4	7,1	34,8	33,3	0,00	0,01	0,09	0,08	0,18	26,5
Ch_1	A_1	B	37,0	35,2	7,8	13,7	0,02	0,01	0,02	0,01	0,06	15,0
		I	52,5	53,5	24,8	29,1	0,03	0,01	0,06	0,02	0,12	30,0
		G	31,2	11,3	67,4	57,2	0,01	0,00	0,18	0,03	0,22	55,0
Ch_2	A_1	B	48,6	41,7	4,3	10,4	0,03	0,02	0,03	0,02	0,10	9,3
		I	41,4	49,3	33,3	45,5	0,03	0,03	0,27	0,07	0,40	37,0
		G	10,0	9,0	62,4	44,1	0,01	0,00	0,50	0,07	0,58	53,7
An_1	A_1	B	55,8	49,2	23,2	7,9	0,04	0,03	0,16	0,02	0,25	24,0
		I	38,2	41,6	39,4	40,5	0,03	0,03	0,27	0,09	0,42	40,4
		G	6,0	9,2	37,4	51,6	0,00	0,01	0,25	0,11	0,37	35,6
	A'_1	B	39,0	37,8	2,2	1,0	0,01	0,01	0,02	0,00	0,04	3,2
		I	45,4	50,6	28,4	29,5	0,01	0,02	0,28	0,06	0,37	29,8
		G	15,6	11,6	69,4	69,5	0,00	0,00	0,68	0,15	0,83	66,9
An_2		B	66,4	60,1	50,8	43,4	0,11	0,12	0,14	0,08	0,45	55,5
		I	27,6	33,1	40,7	36,1	0,04	0,06	0,11	0,07	0,28	34,6
		G	6,0	6,8	8,5	20,5	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08	9,9
An_3		B	58,6	58,6	59,8	44,5	0,97	0,29	0,31	0,13	1,70	57,4
		I	34,9	34,1	31,1	37,6	0,58	0,17	0,16	0,10	1,01	34,1
		G	6,5	7,3	9,1	17,9	0,11	0,04	0,05	0,05	0,25	8,5
T	TA_0	B	58,5	65,4	55,1	50,6	0,42	0,32	0,99	0,46	2,19	56,2
		I	29,8	28,8	38,2	40,0	0,21	0,14	0,69	0,36	1,40	35,9
		G	11,7	5,8	6,7	9,4	0,08	0,03	0,12	0,08	0,31	7,9
	T	B	74,0	66,8	63,7	59,1	0,09	0,09	0,30	0,18	0,66	64,1
		I	21,2	27,4	30,3	35,4	0,02	0,03	0,14	0,11	0,30	29,1
		G	4,8	5,8	6,0	5,5	0,01	0,01	0,03	0,02	0,07	6,8

forte dans les horizons de surface que dans les horizons profonds, ce qui est normal puisqu'elle est liée à une plus forte proportion de matière organique fraîche ; ceci apparaît dans tous les sols où deux horizons (surface et — 20) ont été étudiés, notamment pour les Rendzines.

Les acides humiques gris sont extraits exclusivement ou presque exclusivement au cours des extractions 3 et 4, pour tous les sols à humus très évolués donnant un complexe argilo-humique en agrégats stables : c'est le cas des Mull, des horizons profonds des Rendzines, du Chernozem, du sol châtain, de l'Anmoor calcique fossile.

Au contraire dans les sols où le complexe argilo-humique est moins stable, où l'union des argiles et de l'humus est peu intime, une certaine fraction d'acides humiques G polymérisés est extraite dès les deux premières extractions ; c'est le cas des Moder, des Rankers d'altitude, et également de l'horizon B des Podzols.

En conclusion de ce paragraphe, on notera que la méthode de séparation chimique des composés humiques, que nous décrivons dans le présent mémoire, si elle est inapplicable aux humus peu évolués (tourbes, humus bruts, certains Anmoors), donne des informations satisfaisantes, bien qu'approximatives sur le degré de polymérisation des acides humiques des horizons essentiellement minéraux, à humus évolués ; les résultats obtenus étant d'autant plus précis qu'il existe un complexe argilo-humique formant des agrégats plus stables et mieux définis.

C — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EN FONCTION DES HUMUS ÉTUDIÉS

I — Critères utilisés pour caractériser les humus

La conjonction des résultats des 2 méthodes, méthode d'extraction avec fractionnement chimique et électrophorèse, nous fournira 4 critères fondamentaux qui nous permettront de caractériser les différents humus :

1) *L'efficacité du fractionnement chimique contrôlé par électrophorèse*

Si la séparation par voie chimique entre acides humiques bruns et gris est satisfaisante, c'est que le sol étudié est caractérisé par un complexe argilo-humique floculé, l'union de l'argile et de la matière organique étant alors étroite ; c'est le cas des Mull calciques : Chernozems, horizons profonds des rendzines.

Lorsque la séparation des acides humiques gris se fait mal, c'est qu'au contraire leur liaison avec l'argile n'offre pas le même caractère de stabilité : c'est le propre des Moder, des horizons B des Podzols, à un degré moindre, des Mull acides. Enfin, nous avons vu que pour la matière organique fraîche, incomplètement décomposée (horizons A_0, Tourbes, certains Anmoors tourbeux), tout fractionnement s'avérait impossible.

2) *Nature des acides humiques et répartition en pourcentages dans les 3 catégories B, I, G (tableau 5)*

Ce critère indique, nous l'avons vu, le degré d'évolution et de polymérisation des acides humiques et aussi le degré de liaison avec les colloïdes minéraux, les plus polymérisés (G ou gris) étant liés très intimement avec les argiles ; ils sont

abondants dans les Chernozems, les Anmoors calciques fossiles évoluant vers le Mull : qualitativement, ces humus sont caractérisés par l'abondance du type particulier de gris que nous avons provisoirement désignés par l'expression G_{eh}.

Quant aux intermédiaires, les plus foncés accompagnent les gris, dans ces mêmes humus, alors que les moins foncés de couleur brune sont surtout abondants dans les humus moins évolués.

Notons l'étroite liaison qui existe entre ce critère et un autre critère chimique que nous avons rapidement évoqué : le pouvoir réducteur des acides humiques à l'égard de MnO_4K (tableau 2) ; en principe ce pouvoir réducteur diminue avec le degré de polymérisation ; le Moder d'altitude constitue à ce point de vue la seule exception.

3) *Le rapport acides fulviques/acides humiques* (*tableau* 6)

Ce rapport est faible dans les humus très évolués, fortement polymérisés (Chernozem); il a tendance à être plus élevé dans les autres ; la matière organique en cours de décomposition fournissant beaucoup de produits solubles ; mais alors un autre facteur intervient : le lessivage de ces produits solubles, qui s'insolubilisent plus ou moins dans les horizons minéraux sous-jacents où ils sont à leur tour libérés par l'extraction : ainsi dans le sol ocre podzolique, les acides fulviques de A_1 se retrouvent en B ; le même phénomène se constate dans les podzols, mais l'accumulation d'acides fulviques a lieu surtout au sein de l'horizon B_2 (non B_1) que nous n'avons pas étudié dans le présent travail.

4) *Taux d'humification* (*tableau* 6)

Ce taux donne le pourcentage de composés humiques extraits, par rapport à la matière organique globale ; pour qu'il soit valable il est nécessaire qu'il soit exprimé en *carbone*, la somme des carbones des acides fulviques et humiques étant comparée au carbone total; la somme des résultats des 4 extractions a été utilisée pour ce calcul, pour la plupart des sols ; nous avons signalé que les chiffres obtenus ainsi étaient artificiellement augmentés par les phénomènes de néogenèse en milieu alcalin, de sorte qu'ils ne peuvent caractériser valablement les matières organiques peu évoluées (humus brut, Tourbe, Anmoor tourbeux); nous avons proposé de nous limiter pour ces sols aux deux premières extractions faites au pyrophosphate additionné de ClNa ; le « taux d'humification » ainsi obtenu figure sur la dernière colonne du tableau 6, *entre parenthèse*.

Il y a là une objection sérieuse à l'emploi de ce critère pour caractériser la matière organique : comment savoir à combien d'extractions successives il faut se limiter pour obtenir le taux d'humification le plus proche de la réalité ? Nous répondrons que ce sont les résultats de l'électrophorèse qui trancheront, ainsi que la comparaison des résultats quantitatifs obtenus à chaque extraction ; il n'en reste pas moins qu'appliqué à la matière organique fraîche, ce test semble bien aléatoire, s'il apparaît comme très supérieur à la soude en tant que réactif d'extraction, il semble que le pyrophosphate ne constitue pas encore pour ces humus un solvant idéal.

Si nous comparons les résultats obtenus par notre méthode avec ceux de TIURIN

TABLEAU 6

Taux d'humification et rapports AF/AH

Sols	Horizon	C total %	AF %	AH %	Σ AF + AH	AF/AH	C AF + AH / Ct [1]
P_1	A_0	34,64	1,43	3,07	4,50	0,47	13,0 (6,1)
	B_1	4,56	1,04	1,96	3,00	0,53	65,8
P_2	A_0	10,8	0,70	0,72	1,42	0,97	13,1 (7,5)
	B_1	3,14	0,54	1,55	2,09	0,35	66,6
OP	A_1	6,82	1,08	1,98	3,06	0,55	44,9
	(B)	4,02	1,92	0,95	2,87	2,02	71,4
Rk_1	A_1	12,96	5,10	3,33	8,43	1,53	65,0
	A'_1	4,82	1,73	1,53	3,26	1,13	67,6
Rk_2	A	6,66	2,12	2,31	4,43	0,92	66,5
Br_1	A_1	6,53	0,62	0,37	0,99	1,68	15,2
Br_2	A_1	4,59	0,62	0,79	1,41	0,78	30,7
R_1	A_1	7,19	0,76	0,59	1,35	1,29	18,8
	A(C)	2,76	0,42	0,32	0,74	1,31	26,8
R_2	A_1	5,74	0,66	0,59	1,25	1,12	21,8
	A(C)	4,20	0,58	0,68	1,26	0,85	30,0
Ch_1	A_1	1,48	0,23	0,40	0,63	0,58	42,6
Ch_2	A_1	2,67	0,29	1,08	1,37	0,27	51,3
An_1	A_1	5,90	0,69	1,04	1,73	0,66	29,3
	A'_1	3,46	0,38	1,24	1,62	0,31	46,8
An_2		9,73	0,90	0,81	1,71	1,11	17,6 (10,8)
An_3		11,67	1,37	2,96	4,33	0,46	37,1 (28,4)
T	A_0	44,74	1,54	3,90	5,44	0,39	12,2 (5,2)
	T	47,51	1,36	1,03	2,39	1,32	5,0 (2,2)

[1] Les chiffres entre parenthèses correspondent au taux d'humification rectifié (calculé avec les deux premières extractions).

(1951), nous constatons que nos chiffres varient dans le même sens, pour les divers sols étudiés mais en étant toujours nettement inférieurs ; ceci paraît lié à l'emploi de la soude — que nous avons déjà discuté — comme réactif d'extraction dans la méthode de TIURIN.

Il ne faut pas se dissimuler que notre méthode donne pour le calcul du taux d'humification des chiffres certainement inférieurs à la réalité, notamment pour certains sols caractérisés par une liaison très étroite entre l'argile et certains composés humiques : une grande partie de ceux-ci échappe à tout procédé d'extraction chimique simple (Chernozems). Néanmoins, nous pensons que la comparaison des chiffres obtenus entre eux, permet de faire d'utiles constatations.

Enfin nous signalerons que pour la pratique courante il n'est pas nécessaire de procéder à un dosage distinct par extraction ; on peut effectuer 2 dosages (pour les 2 premiers extraits et les 2 derniers) ou même un seul, en mélangeant les fractions aliquotes correspondant à chaque extraction.

II — CARACTÉRISTIQUES DES HUMUS ÉTUDIÉS

1°) *Dans les podzols et les sols podzoliques*, les horizons A_0 d'humus brut (non étudié dans le sol ocre podzolique) présentent des caractères constants : séparation impossible par voie chimique des différentes formes d'acides humiques (néoformation de bruns en présence d'un réactif alcalin), humification et polymérisation très faibles (absence à peu près complète de gris), peu d'acides fulviques en raison des phénomènes de migration de produits solubles.

L'humus brut provenant de la tourbe par assèchement superficiel (TA_0) est absolument semblable. Quant à la tourbe proprement dite, elle présente les mêmes caractères en plus accentués encore ; elle est seulement plus riche en acides fulviques, hérités de la surface par lessivage.

L'horizon B des podzols est caractérisé par un taux d'humification très élevé, mais une faible polymérisation ; la répartition des acides humiques est sensiblement la même qu'en A_0 avec une certaine tendance au passage des bruns, à la catégorie intermédiaire » (cf. aussi B du sol O. P., particulièrement riche en acides fulviques comme les B_2 des podzols).

2°) *Les Moder* (horizon A_1) offrent des caractères très particuliers : absence ou faible cohésion du complexe argilo-humique, rendant la séparation chimique des acides humiques peu satisfaisante, faible polymérisation des acides humiques avec dominance des bruns, mais par contre, *taux d'humification élevé*, beaucoup plus que pour les Mull à altitude égale. Ces caractères s'accentuent notablement quand il s'agit des Moder des Rankers pseudo-alpins (altitude 1 200 m), à couche humique très développée : le taux d'humification est alors comparable à celui de l'horizon B des podzols, en outre on voit apparaître une certaine proportion de gris.

3°) *Les Mull forestiers des sols bruns lessivés* sont bien différents des Moder ; le complexe argilo-humique mieux caractérisé rend la séparation chimique des acides humiques plus facile. La répartition des différentes catégories est la même que dans tous les sols non saturés ; mais ce qui frappe c'est l'*humification relativement peu*

poussée, surtout pour les Mull de plaine (ceux-ci sont souvent à peine visibles et méritent alors le nom de cryptomull); en altitude, par contre, l'humification est beaucoup plus importante quoique moindre que dans les Moder à altitude égale.

4°) *Les Rendzines,* en surface, offrent des caractères comparables à ceux des Mull non saturés ; on note seulement un taux d'humification un peu plus élevé et une proportion de gris un peu plus forte ; mais l'horizon A_1 des rendzines forestières atteint 25 à 30 cm d'épaisseur, et en profondeur, la polymérisation et l'humification augmentent en même temps que la solidité des liaisons argilo-humiques : les gris représentent 25 à 30 p. 100 des acides humiques, le taux d'humification 27 à 30 p. 100.

5°) Dans les *Chernozems* et à un degré moindre *les sols châtains de steppe,* ces caractères de polymérisation, d'humification très poussée, de liaison intime des colloïdes minéraux et organiques s'accentuent considérablement; les acides fulviques deviennent très peu abondants (rapport AF/AH très inférieur à 1), les acides humiques gris sont très nettement dominants et on voit apparaître cette forme particulière que nous avons désignée par G_{ch}. La méthode de séparation chimique atteint pour ces sols l'efficacité maxima.

6°) *Les Anmoor ou humus semi-tourbeux* offrent des caractères très différents selon qu'ils ont évolué en milieu constamment saturé d'eau (An_2) : ils se rapprochent alors des Tourbes ; ou bien qu'ils ont subi une phase d'assèchement marquée en surface (Anmoor évoluant vers le Mull An_1), dans ce dernier cas, tous les critères utilisés (y compris la présence de la forme des gris G_{ch}) indiquent une *analogie saisissante de cet humus avec le Chernozem typique;* les chiffres portés sur les tableaux 4 et 5 aussi bien que l'aspect des électrophorégrammes sont identiques pour les 2 catégories de sols.

Quant à l'Anmoor acide An_2, subissant des phases d'assèchement temporaire, il occupe une place intermédiaire entre les deux autres types étudiés.

III — Évolution des humus en fonction du milieu

Des conclusions intéressantes peuvent être tirées de ces recherches, au sujet de l'évolution de la matière organique des sols étudiés en liaison avec les facteurs écologiques.

1°) *Genèse et évolution des types fondamentaux d'humus*

On constate que, pour les types d'humus de surface étudiés, les trois caractères fondamentaux : degré de liaison avec l'argile, polymérisation, taux d'humification, vont le plus souvent de pair ; ces trois facteurs augmentent régulièrement dans l'ordre suivant : Mor, Mull, Mull calcique (rendzine), Chernozem et Anmoor calcique fossile. Un seul humus fait exception, c'est le Moder (horizon A_1) qui est caractérisé par un taux d'humification très élevé (surtout en altitude), alors que le degré de polymérisation des acides humiques n'est pas très poussé (acides humiques bruns dominants). On notera ce caractère original des Moder, trop souvent considérés comme un simple humus intermédiaire entre le Mull et le Mor.

Les différences entre Mull et Moder sont, en fait, importantes ; elles s'expliquent

aisément ; le Mull, en raison de son activité biologique élevée est caractérisé par la formation précoce du complexe argilo-humique sous l'influence des lombrics ; la liaison de composés organiques incomplètement décomposés avec les argiles ralentit le processus d'humification ultérieur ; le même caractère se retrouve dans l'horizon de surface des rendzines pour lequel on aurait pu s'attendre à un taux d'humification plus élevé.

Le Moder, au contraire, dont l'activité biologique est plus faible n'offre pas de complexe argilo-humique nettement différencié. L'horizon A_1 souvent épais, et formé sous un mince A_0 (2 à 4 cm) contient beaucoup de matière organique libre, fortement humifiée par l'action digestive des arthropodes inférieurs (KUBIENA, 1953). En outre, il semble que le Moder hérite de composés solubles venant de la litière et de l'horizon A_0 qui le surmonte ; ces composés solubles se polymérisent sur place ; l'analogie des A_1 des Moder avec le B des podzols est flagrante : la polymérisation est seulement plus immédiate, ce qui interdit au moins partiellement les processus de migration.

Le processus de la podzolisation peut se reconstituer par la comparaison des horizons A_0 (Mor) et des horizons B des podzols : l'humification est réduite en A_0, les composés solubles (acides fulviques) migrent rapidement en profondeur ; ils se retrouvent dans l'horizon B des sols ocres podzoliques, et dans l'horizon B_2 des podzols, non étudié ici (DUCHAUFOUR, 1956). Quant à l'horizon B_1, il est caractérisé par une forte accumulation d'acides humiques bruns (le taux d'humification est très élevé); ceux-ci pourraient provenir d'une insolubilisation et polymérisation des composés solubles venant de la surface (BURGES, 1960, DUCHAUFOUR-JACQUIN, 1959).

2°) *Influence des facteurs écologiques sur l'évolution des humus*

Deux facteurs semblent jouer un rôle essentiel dans cette évolution; les variations du climat, ou plus exactement du « microclimat interne » du sol, et la teneur en cations bivalents échangeables, calcium et magnésium.

L'influence de l'altitude est très facilement mise en évidence par la comparaison des taux d'humification qui croissent régulièrement avec l'altitude : le phénomène est particulièrement marqué pour les Rankers pseudo-alpins formés à 1 200 m ou 1 300 m et dont l'humification est maxima.

Cette humification poussée des sols de montagne nous paraît étroitement liée aux « contrastes microclimatiques » que subissent ces sols, alternativement saturés d'eau à la fonte des neiges, et fortement desséchés, par l'action des radiations solaires intenses, pendant les périodes de beau temps.

Ce fait doit être rapproché de l'observation faite par IARKOV (1956) au sujet des Chernozems : leur forte humification est attribuée par cet auteur aux contrastes microclimatiques accentués qu'ils subissent ; en hiver, ils sont recouverts de neige et soumis au gel ; saturés d'eau à la fonte des neiges au printemps, ils se dessèchent totalement en été. Les composés fulviques, les plus solubles, prendraient naissance au cours de la phase humide, ils s'insolubiliseraient par dessiccation en période chaude.

La faible humification des Mull atlantiques s'explique en grande partie par des conditions climatiques opposées : leur faible humification paraît liée aux faibles contrastes saisonniers, ces sols étant rarement soumis à une dessiccation intense et prolongée ; ils s'opposent par-là aux Mull d'altitude, tels que celui que nous avons étudié, et aussi aux Mull continentaux.

Enfin l'étude des « Anmoors » fournit un exemple plus caractéristique encore de l'influence des contrastes microclimatiques sur l'évolution de la matière organique ; la seule différence avec les humus des climats montagnards et continentaux réside dans le fait qu'ici, les variations microclimatiques dépendent, non du climat général, mais de l'évolution d'une nappe phréatique humectant plus ou moins l'humus. Tant que l'Anmoor est soumis à l'influence de la nappe, qui reste peu profonde, et le maintient humide par capillarité, il garde des caractères voisins de la Tourbe (An_2) ; une fluctuation plus poussée de la nappe provoquant un assèchement temporaire partiel de l'humus conduit à une humification plus poussée (An_3). Enfin, les Anmoors fossiles, évoluant vers le Mull (An_1), qui ont été soumis à une phase de dessiccation prolongée par abaissement continu du niveau de la nappe, offrent des caractères de polymérisation (dominance des acides humiques gris) et d'humification exactement semblables à ceux des Chernozems (DUCHAUFOUR, 1960) : c'est très justement que ces sols ont été autrefois désignés par l'expression « pseudo-chernozems ».

Ces derniers humus, Anmoor calcique, fossile, Chernozem, montrent en outre l'influence des ions calcium et magnésium saturant le complexe absorbant, sur la polymérisation accentuée des composés humiques : *la présence, en abondance, de ces ions bivalents, dans le complexe absorbant semble en effet nécessaire à la synthèse des acides humiques gris.* En milieu acide, la polymérisation semble s'arrêter au stade des bruns ou des intermédiaires, même si les facteurs climatiques ou microclimatiques, favorisent une forte humification ; ainsi dans le Moder d'altitude, très humifié, les acides humiques gris sont relativement peu abondants, parce que le milieu est très acide et très pauvre en bases. Pour les Rendzines atlantiques, c'est l'inverse : l'humification est freinée assez rapidement par une formation précoce du complexe argilo-humique, agissant en liaison avec de faibles contrastes climatiques ; mais l'abondance de l'ion calcium, l'alcalinité du milieu permettent la formation d'une notable quantité d'acides humiques gris. C'est seulement dans les Chernozems et les Anmoors calciques fossiles que les deux facteurs, agissant concurrement, donnent lieu à la fois à un degré d'humification et de polymérisation qui n'est atteint par aucun autre type d'humus.

Reçu pour publication en décembre 1962.

ANNEXE : DÉTAIL DES MÉTHODES

1. — EXTRACTION ET DOSAGE DES ACIDES HUMIQUES (AU PERMANGANATE N/10)

1) *Extraction*

— 5 g de sol séché à l'air ou 1 g (sols dont le taux en matière organique est supérieur à 20 p. 100) sont placés en contact de 100 cc de solution d'extraction.

— La suspension est agitée 1 heure à l'agitateur mécanique puis centrifugée (4 500 t/mn : 5 mn).

— Décanter et recueillir le surnageant.

Réaliser ainsi 4 *extractions successives :*

— Les 1re et 2e extractions avec solution pyrophosphate de sodium + NaCl 5 p. 100

— Les 3e et 4e extractions avec solution pyrophosphate de sodium 1 p. 100

Floculer les argiles de la 4e extraction par 1 p. 100 de chlorure de sodium. Laisser déposer 4 heures, centrifuger, décanter, recueillir le surnageant.

2) *Précipitation des acides humiques*

— Prélever et introduire dans un tube de centrifugeuse une fraction aussi importante que possible, par exemple 70 cc de la solution d'extraction et 0,7 cc de H_2SO_4 pur (soit 1/100 du volume de la solution prélevée).

— Laisser les flocons se rassembler (laisser déposer 4 heures au minimum) puis centrifuger (4 500 t/mn : 5 mn).

— Décanter, recueillir le liquide surnageant dans une fiole jaugée de 100 cc. Rincer le précipité par des additions successives de H_2SO_4 N/10 (exemple, 10 cc H_2SO_4 N/10 × 2 fois). Après addition de la solution de rinçage à la solution obtenue précédemment, ajuster à 100 cc avec de l'eau distillée. *La solution contient les acides fulviques.*

3) *Redissolution des acides humiques*

— Le précipité est redissout dans un volume de NaOH N donné (20 cc à 25 cc environ, lorsqu'on a affaire à une série de sols, le volume choisi pour tous les sols est celui qui est nécessaire à la dissolution du précipité le plus important).

— Transvaser quantitativement dans une fiole de 100 cc. Compléter à 100 cc avec de l'eau distillée.

4) *Titration*

a) *Solutions d'acides fulviques.*

— Prendre un aliquot de la solution et neutraliser à l'aide de soude 5 N (le calcul du volume de NaOH est fait au préalable par titration en présence de rouge de méthyle).

— Placer dans un erlenmeyer au contact de 20 cc de MnO_4K N/10. Le mélange est porté à l'ébullition qui est exactement maintenue 10 mn puis additionné de 25 cc H_2 SO_2 1/5 puis 20 cc d'acide oxalique N/10.

— Titrer en retour par MnO_4K N/10 (t : environ 40°C) ; si le volume de MnO_4 K versé dépasse 12 cc, l'essai est refait sur une fraction moins importante).

Faire un témoin avec chaque solution d'extraction.

b) *Solution d'acides humiques.*

— La titration est menée comme celle des acides fulviques (sans neutralisation préalable).

Expression des résultats : en carbone ; la correspondance de 1 cc de MnO_4K réduit et du poids d'acides fulviques et d'acides humiques, est établie pour chaque type d'humus étudié, par comparaison avec la méthode ANNE modifiée (voir méthode jointe). L'extraction est effectuée au pyrophosphate à 1 p. 100 sur un poids de sol suffisamment élevé.

Pour effectuer une comparaison valable, la solution d'acides fulviques (de même que celle d'acides humiques) est séparée en 2 volumes égaux, l'un servant au dosage au permanganate, l'autre au dosage de C par la méthode ANNE modifiée.

Remarque : On peut effectuer les dosages sur les 4 fractions séparément, ou sur les 2 premières et les 2 dernières simultanément, ou même un seul dosage sur les 4 extractions réunies : dans ce cas on mélange une même fraction aliquote des extraits qu'on désire doser ensemble.

II. — DOSAGE DU CARBONE DES ACIDES HUMIQUES ET FULVIQUES EXTRAITS AU PYROPHOSPHATE A 1 %

(Méthode ANNE modifiée [1])

1) *Acides humiques*

— Précipiter par SO_2H_4 une fraction aliquote de la solution. Centrifuger.

— Redissoudre dans 20 à 50 cc NaOH N suivant quantité d'acides humiques à dissoudre : amener à 50. Prélever fraction aliquote.

— Neutraliser par quantité calculée de SO_4H_2 N ou SO_4H_2 4N.

[1] Méthode applicable aux extraits de composés humiques (pyrophosphate de Na 1 p. 100) en solution peu concentrée.

— Ajouter quantité suffisante de H_2O pour 40 cc.
— Ajouter 1,2 g bichromate solide.
— Ajouter 60 cc SO_4H_2 pur.
— Ébullition 10 minutes.
— Amener à 150 cc.
— Prendre 25 cc pour le dosage au sel de Mohr, soit 1/6 de l'extrait total.

2) *Acides fulviques*

— Fraction aliquote 40 cc par exemple, prélevée à la pipette (2 × 20).
— Ajouter 60 cc SO_4H_2 pur (légèrement par défaut).
— Ajouter 1,2 g de bichromate solide.
— Ébullition 10 minutes.
— Compléter à 150.
— Titrer sur fraction aliquote de 25 comme précédemment.

III. — ÉLECTROPHORÈSE

— Extraction des acides humiques en 4 fractions, par la méthode chimique décrite ci-dessus ; précipitation des acides humiques dans chaque fraction par HCl à la concentration finale de 1 p. 100 (on peut employer SO_4H_2, dans les mêmes conditions, mais alors les lavages à l'acide dilué, puis à l'eau doivent être effectués très soigneusement).

— Les acides humiques lavés à l'acide N/10, puis à l'eau, sont redissous par NaOH N, en quantité juste suffisante pour obtenir un produit pâteux sans granulation.

— Dépose sur bande papier Arche 302 de 7 cm × 27 cm (largeur de la dépose : 5 cm), de 40 microlitres de solution d'acides humiques, à l'extrémité de la bande, côté cathode.

— Migration, pendant 3 heures, sous un voltage de 200 volts (soit 10 V par cm), en milieu tamponné à pH 7,4 (tampon à base de phosphate monopotassique M/5 et solution NaOH N/5) ; cuve à électrophorèse FRENTZ.

— Les électrophorégrammes séchés sont décomposés en bandes d'une largeur de 4 cm, et passés au densitomètre Zeiss, inscrivant sur un graphique la densité optique des bandes obtenues.

SUMMARY

INVESTIGATIONS ON THE EXTRACTION AND FRACTIONATION OF HUMIC COMPOUNDS CONTROLLED BY ELECTROPHORESIS

A method of chemical extraction and fractionation of humic coumpounds in soil had been elaborated, using 1 p. 100 sodium pyrophosphate as extractant.

The soil is extracted four times, the first two extractions in slightly alkaline medium (yielding fulvic acids and the less polymerized humic acids), and the last two ones in a more alkaline medium (yielding the more polymerized humic acids which are bonded to clays).

The humic acids in each fraction were studied by means of paper electrophoresis, with the following results :

1) An alkaline medium is required during extraction for dispersing clays and dissolving humic acids which are bonded to clay ; however, fresh organic matter is also attacked, resulting in the new formation of brown humic acids ;

2) This method of chemical fractionation is consequently satisfactory only for soils containing well evolved humus ;

3) Combining the results obtained by the two methods studied, the humus may be characterized by four basic criteria :

— efficiency of chemical fractionation,
— per-cent distribution of humic acids,
— ratio of fulvic acids to humic acids,
— degree of humification,

4) The two most important ecological factors affecting the evolution of humus are : seasonal variations in the microclimate and abundance of calcium and magnesium in the absorbing complex.

ZUSAMMENFASSUNG

VERSUCH EINER DURCH ELEKTROPHORESE GEPRÜFTEN EXTRAKTIONS- UND FRAKTIONIERUNGSMETHODE DER HUMUSVERBINDUNGEN

Es wurde eine chemische Extraktions- und Fraktionierungsmethode der Humusverbindungen des Bodens ausgearbeitet, mit Hilfe von 1 p. 100 Na-Pyrophosphat als Extraktionsreagens.

Vier Bodenextraktionen wurden vorgenommen, die zwei ersten in schwach alkalischem Milieu (Auszug der am wenigst polymerisierten Fulvo- und Humussäuren), die zwei letzten in stärker alkalischem Milieu (Auszug der mehr polymerisierten und an Ton gebundenen Humussäuren).

Die Humussäuren beider Fraktionen wurden durch Elektrophorese auf Papier untersucht.

Hier die Ergebnisse :

1) Die Alkalinität des Extraktionsmilieus scheint für die Dispersion der Tone und die Löslichkeit der an Sie gebundenen Humussäuren notwendig zu sein, aber sie greift die frische organische Masse an und bildet so braune Humussäuren.

2) Deshalb gibt diese chemische Fraktionierungsmethode nur auf Böden mit evoluiertem Humus Genugtuung.

3) Verbindet man die durch die zwei untersuchten Methoden sich ergebenden Resultate, so kann man den Humus nach vier grundlegenden Kriterien charakterisieren :

— Wirksamkeit der chemischen Fraktionierung
— Prozentuale Verteilung der Humussäuren
— Verhältnis Fulvosäuren/Humussäuren
— Humifizierungssatz.

4) Es sind zwei wichtige ökologische Faktoren, die auf die Evoluierung des Humus einwirken : die jahreszeitlich bedingten Gegensätze des Mikroklimas und die Menge des Calziums und Magnesiums im Sorbtionskomplex.

РЕЗЮМЕ

Исследование метода извлечения и фракционирования гуммусовых соединений с контролем электрофорезом.

Ф. ДЮЩОФУР и Ф. ЖАКЕН (Нанси).

Авторами разработан метод химического извлечения и фракционирования гуммусовых соединений при помощи раствора пирофосфата натрия 1 % в качестве реактива.

Из каждого сорта почв извлекается по четыре вытяжки, две — в слабо щелочной среде (фульво-кислоты и гуминовые кислоты наименее полимеризованные) две другие — в среде сильно ощелоченной (извлечение более полимеризованных гуминовых кислот связанных глиной).

Гуминовые кислоты каждой фракции подвергаются исследованию электрофорезом на бумаге.

Получены следующие результаты :

1 Щелочность среды извлечения кажется авторам необходимой для диспергирования глин и для растворения гуминовых кислот ими связанных, но с другой стороны щелочность эта, действуя на свежее органическое вещество, вызывает нэоформацию бурых гуминовых кислот.

2 В виду вышеуказанного этот метод химического фракционирования может быть применен с успехом исключительно к почвам содержащим « зрелый » гуммус.

3 Комбинируя результаты полученные при помощи двух предлагаемых методов авторы считают возможным охарактеризовать гуммус четчрьмя основными критериями :

— эффективность химического фракционирования;
— распределение по % гуминовых кислот;
— соотношение фульво-кислоты/гуминовые кислоты;
— процент гуммификации.

4 Два экоглогических фактора влияющих на эволюцию гуммуса кажутся также важными : сезонные контрасты микроклимата и изобилие кальция и магнезия в абсорбционном комплексе.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE, 1945. Dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **2**, 161-172.

BUCH (Max von), 1962. Vergleichende chemische und mikromorphologische Untersuchungen bei der Extrahierung von Huminstoffen aus Waldböden. *Zeitschrift Pflanz. Düngung Bodenkunde*, **97** (3), 255-265.

BURGES A., 1960. Chemical studies on humic acid from a podzol soil. 7e *Congress intern. Soc. Soil Sci.*, II, 128-133.

CHAMINADE R., 1946. Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols. *Ann. agron*, **2**, 119-132.

COULSON C. B., DAVIES R. I., KHAN E. J. A., 1959. Humic-acid investigations. II. Studies in the fractionation of humic acids. *Soil Sci.*, **10** (2), 271-283.

DEUEL H., DUBACH P., MEHTA N. C., BACH R., 1960. Zur chemie der organischen Substanz des Bodens. *Schweizer. Zeitschrift Hydrologie*, **22** (1), 111-121.

DUCHAUFOUR Ph., 1954. Essai de fractionnement de différents complexes humiques dans les sols *C. R. Acad. Sci*, **238**, 836-838.

DUCHAUFOUR Ph., 1956. Note sur les phases de la podzolisation sur grès vosgien. *VIe Congrès Intern. Sci. Sol, Paris*, **V**, 60, vol. E, 367-370.

DUCHAUFOUR Ph., 1960. Note sur l'influence des variations du microclimat du sol dans les processus d'humification. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 4422-4424.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1959. Note sur l'évolution de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Agric. France*, 4 p.

IARKOV S. P., 1956. Dynamique saisonnière de certains processus dans les sols. *VIe Congrès Sci. Sol, Paris*, **V**, 66, vol. E, 401-405.

JACQUIN F. 1959. Contribution à l'étude chromatographique des extraits de sols. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 3019-3020.

JACQUIN F., 1960. Étude chromatographique de plusieurs types d'humus. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 1892-1893.

JACQUIN F., 1961. Contribution à l'étude d'humus naturels par électrophorèse sur papier. *Bull. École nat. sup. agron. Nancy*, **3** (2), 106-113.

JACQUIN F., 1962. Étude quantitative de deux phénols issus de l'hydrolyse d'acides humiques naturels. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 2623-2625.

KONONOVA M. M., BELCHIKOVA N. P., 1961. Rapid methods for the determination of humus composition in minéral soils. *Pochvovedenie*, *10*, 75-87.

KONONOVA M. M., TITOVA N. A., 1961. Use of paper electrophoresis for fractionation of the humic substances of soil and for study of their complex compounds with iron. *Pochvovedenie*, **11**, 81-189.

KUBIENA, 1953. The soils of Europe, illustrated diagnosis and systematics. Thomas MURBY édit., Londres.

MANIL G., 1961. Quelques aspects actuels du problème de la matière organique des sols. *Meded. Landbouwhogesch. Gent*, nº **1**, 50-83.

SCHEFFER F., SCHLÜTER H., 1959. Uber Aufbau und Eigenschaften der Braun-und Grauhuminsäuren. *Z. Pflanz. Düngung Bodenkunde*, **84**, 184-193.

SCHEFFER F., ZIECHMANN W., PAWELKE G., 1960. Über die schonende Gewinnung natürlicher Huminstoffe mit Hilfe milder organischer Lösungsmittel. *Z. Pflanz, Düngung Bodenkunde*, **90**, 58-69.

TIURIN I. V., 1951. Vers une méthode d'analyse pour l'étude comparative des constituants de l'humus du sol. *Acad. Sci. U. R. S. S., Trav. Inst. Sols Dokutchaiev*, **38**, 32 p.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 919-929

ÉTUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE DE QUATRE ÉCHANTILLONS DE SOLS DU CENTRE NIVERNAIS

J. DEJOU

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon (Côte-d'Or)

SOMMAIRE

La fraction argileuse de quatre sols du Centre Nivernais a été soumise à plusieurs examens analytiques. La confrontation des résultats acquis montre que ce matériel est constitué par un mélange d'Illite et de Kaolinite.

Localisation des prélèvements

L'étude minéralogique de la fraction argileuse $< 2\,\mu$ a été effectuée sur quatre échantillons de sols récoltés dans le Centre nivernais à quelques kilomètres à l'est de Premery. Cette étude, qui complète une prospection pédologique a été réalisée sur un espace restreint (10 km $\times$ 8 km), et en se cantonnant simplement aux dépôts sédimentaires, qui forment une série continue et fort variée depuis l'Hettangien au Jurassique moyen.

La situation géographique des prélèvements est précisée dans le tableau 1 ci-joint.

Répartition granulométrique de la fraction argile

Elle a été mesurée par l'analyse densimétrique à la suite d'une sédimentation de 400 heures, la stabilité de la suspension étant assurée d'une manière satisfaisante par l'hexamétaphosphate de Na. Les résultats sont groupés dans le tableau ci-après.

Ces chiffres font apparaître un certain nombre d'analogies entre les argiles n° 54 et 73 d'une part, récoltées à 1 200 mètres de distance, et les argiles n° 153 et 212 dont les gisements sont distants de 6,5 km environ.

TABLEAU I

n° des échantillons	Situation des profils	Coordonnées Lambert	Substratum géologique	Type de profils observés	Horizon pédologique et profondeur du prélèvement de la fraction < 2 μ
1°) 54	Grand Pré de Boulon	Premery : 681,9 × 243,3	Lias sup. : Marne de l'Aalénien	Sol brun lessivé à pseudogley	Bg : 70-85 cm
2°) 73	Courgeon	Premery : 681 × 242,5	Lias sup. : Marne de l'Aalénien	Sol lessivé à gley de profondeur	G : 60-75 cm
3°) 153	Les Badières	Premery : 683 × 240,2	Domérien : Marne et calcaire marneux	Sol brun peu lessivé à pseudogley	B : 50-70 cm
4°) 212	Oulon	Premery : 680,4 × 245,4	Bajocien inf. : Oolithe ferrugineuse	Sol brun profond	(B) : 30-40 cm

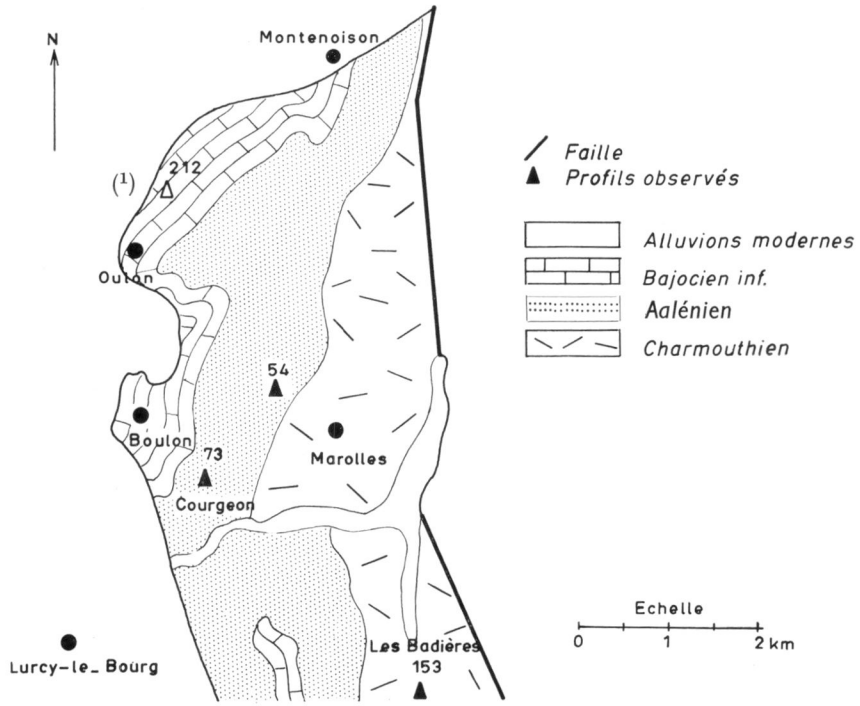


FIG. 1 — *Position des profils*

En effet, la répartition des effectifs granulométriques indique respectivement pour les particules de diamètre compris entre 0,8 μ et 2 μ : 16,2 p. 100 et 17,3 p 100, — 25,7 p. 100 et 24,2 p. 100, de l'ensemble, et pour la fraction 0,6 — 0,8 μ : 4 p. 100

(1) Erratum : Le triangle △ 212 devrait être en noir.

et 3,4 p. 100 — 14,3 et 9,1 p. 100. Il est remarquable de noter ensuite qu'aucune particule de diamètre compris entre 0,53 et 0,6 μ ne se rencontre dans les quatre échantillons, ce qui établit entre eux un point commun tout comme le faible pourcentage des effectifs 0,38-0,53 μ. Ces particularités avaient été signalées également lors d'une étude de la fraction argileuse extraite des sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne (Jura) en 1961 et J. J. FRIPIAT et M. C. GASTUCHE (1952) avaient noté une observation identique pour une kaolinite du Congo.

TABLEAU 2

Analyse granulométrique de la fraction argile

Dimensions des particules en microns	Échantillon 54 (Profondeur 70-85 cm)		Échantillon 73 (Profondeur 60-75 cm)		Échantillon 153 (Profondeur 50-70 cm)		Échantillon 212 (Profondeur 30-40 cm)	
	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ
1,15-2	5,8	9,4	5,1	11,8	4,0	11,4	4,5	13,6
0,8-1,15	4,2	6,8	2,4	5,5	5,0	14,3	3,5	10,6
0,60-0,80	2,5	4,0	1,5	3,4	5,0	14,3	3,0	9,1
0,53-0,60	0	0	0	0	0	0	0	0
0,38-0,53	3,0	4,8	0,5	1,1	1,5	4,3	0	0
< 0,38	46,5	75,0	34,0	78,2	19,5	55,7	22,0	66,7
Total	62,0	100,0	43,5	100,0	35,0	100	33,0	100,0

Dans le Centre nivernais, la majeure partie du matériel est constituée de particules très fines < 0,38 μ, qui représentent jusqu'à 75 p. 100 du total argileux pour les échantillons 54 et 73 ; ce caractère intervient, au même titre que la teneur élevée en argile, pour communiquer à la plupart des sols de la région une forte compacité, source de conséquences défavorables pour l'économie agricole locale.

DIFFRACTION AUX RAYONS X

Les analyses à l'aide du diffractomètre à rayons X ont été exécutées à l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand par Mme MERGOIL et Mlle F. BOUDIER. Les diagrammes n'ont été réalisés que pour les très petits angles donnant les raies à grand écartement et les résultats sont les suivants :

Échantillons	Équidistances réticulaires en Å
54	10,40 (pics très bien définis et de forte intensité) 7,13
73	10,50 (pics de forte intensité) 7,13
153	10,40 pics de forte intensité) 7,2
212	10,6 (pic mal défini)

Il semble donc qu'il y ait identité de composition dans le matériel argileux des trois premiers échantillons, avec comme constituants l'Illite et la Kaolinite alors que le dernier s'écarte sensiblement de cette diagnose, puisqu'il paraît ne pas contenir de kaolinite, mais seulement de l'Illite.

Diffraction électronique

Les examens ont été réalisés également à Clermont-Ferrand par les mêmes chercheurs et chaque échantillon a subi la diffraction électronique de trois manières successives suivant une technique précisée en 1959 par J. Lucas, Thérèse Camez et G. Millot.

1°) à l'état naturel, sans le moindre traitement ;

2°) après traitement par la chaleur à 550° ;

3°) après traitement par le glycérol.

Pour les quatre argiles, quel que soit leur traitement, les distances réticulaires calculées ont donné les valeurs suivantes :

4,52 Å — forte;
2,60 Å — forte;
2,48 Å — très faible (raie dédoublée);
1,70 Å — forte;
1,50 Å — moyenne;
1,27 Å — très faible;

L'interprétation de ces diagrammes est assez délicate, car ils ne font pas apparaître les raies à grand écartement, si essentielles pour l'identification des argiles et mises en évidence par la diffraction aux rayons X. D'autre part, la comparaison de ces résultats avec ceux donnés par R. E. Grim (1953) indiquerait uniquement la présence d'Illite dans le matériel analysé, aucune raie ne pouvant être attribuée à la kaolinite cependant bien décelée par la technique précédente.

Toutefois, une remarque paraît ici s'imposer grâce à la diffraction électronique : les traitements à la chaleur ou au glycérol n'entraînent aucune modification dans l'allure des diagrammes des argiles naturelles, propriété essentielle de l'Illite dont la présence se trouve de la sorte confirmée.

Analyses thermo-pondérales

Les courbes thermo-pondérales établies par Mlle F. Boudier (avril 1962) affectent une physionomie très voisine les unes des autres, et traduisent une parenté certaine dans la constitution minéralogique des quatre échantillons du Centre nivernais. Elles sont relativement proches du type illitique, ce qui annonce l'importance de la fraction de ce minéral dans l'ensemble du matériel argileux. Au départ, elles rappellent sans conteste le type illitique (illite de l'Illinois notamment) avec une perte d'eau marquée entre 100 et 250°, mais à patir de 280° jusqu'à 400°, on observe dans tous les cas un ressaut qui ne peut être attribué ni à l'Illite, ni à la Kaolinite, mais qui est dû, comme l'ont montré les travaux de Marthe Bonifas (1959) aux oxydes de fer, tel que la *Gœthite*. Cet accident est plus ou moins accusé, mais le

maximum de son intensité se remarque dans l'argile n° 212 d'Oulon, résultat parfaitement en accord avec le contexte stratigraphique puisque le sol repose ici sur l'Oolithe ferrugineuse du Bajocien inférieur. Par la suite, un troisième crochet apparaît entre 500° et 650°, toujours moins développé que dans la kaolinite pure, si

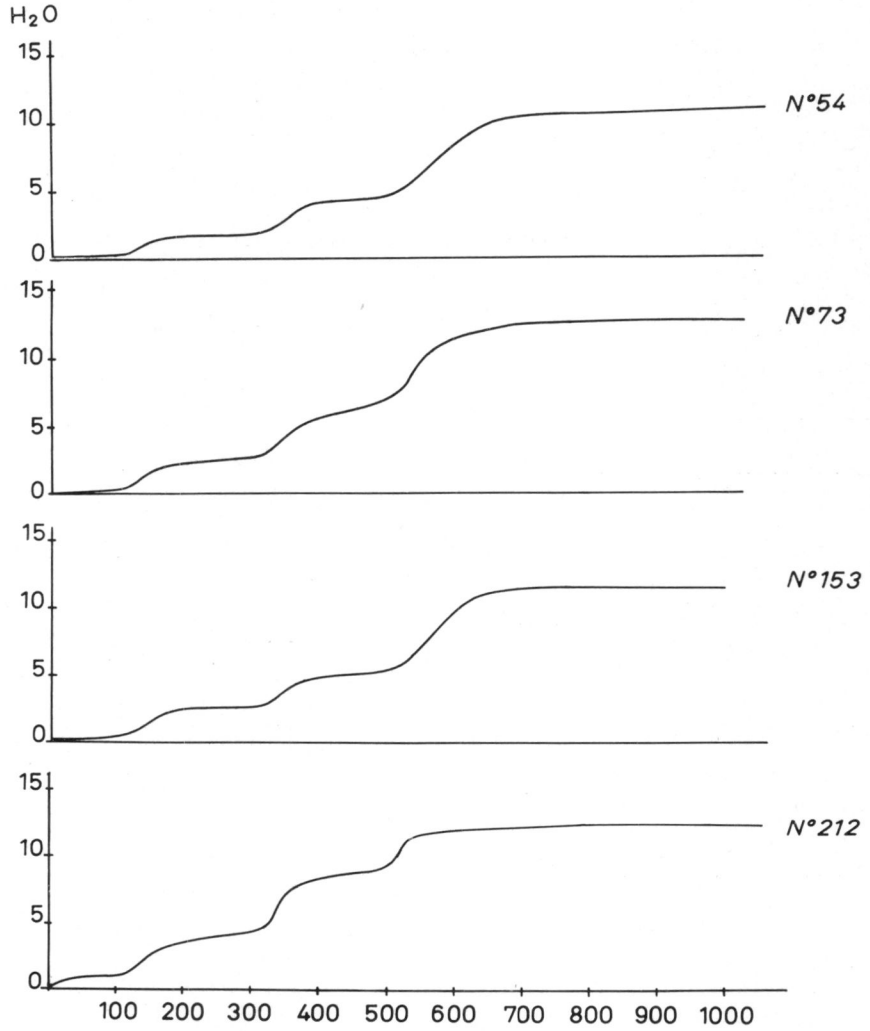


FIG. 2 — *Courbes thermo-pondérales — Argiles du centre Nivernais*

on le compare aux échantillons de référence étudiés par Mlle CAILLÈRE au Muséum d'Histoire Naturelle ou par NUTTING P. G. (1943) en Californie. Il est nettement plus prononcé dans les argiles n° 54 — 73 — 153 ce qui fournit une indication de l'association de la Kaolinite à l'Illite prédominante que dans l'argile 212 où les rayons X n'ont décelé que de l'Illite.

Ainsi les données de l'analyse thermo-pondérale recoupent celle de la diffraction, mais apportent un élément nouveau dans l'identification recherchée, à savoir

la mise en évidence d'*oxyde de fer* dans ce mélange argileux, très certainement à l'état amorphe, puisqu'il ne peut être caractérisé par les examens aux rayons X.

TABLEAU 3

Répartitions de pertes d'eau en valeurs absolues aux différentes températures

	Températures	Argile 54	Argile 73	Argile 153	Argile 212
1°) Eau d'adsorption du complexe et de constitution de l'Illite	20°-280°	2,25	2,92	2,33	4,20
2°) Déshydratation du mélange, mais une partie entrant dans la constitution de la Goethite	280°-400°	1,66	3,00	2,00	3,95
3°) Illite + Kaolinite (absente dans le n° 212)	400°-650°	6,20	5,66	6,50	4,32
4°) Eau résiduelle	650°-1000°	1,00	1,16	0,67	0,66
Total en %		11,11	12,74	11,50	13,13

TABLEAU 4

Pertes en valeurs relatives pour total = 100

Pertes d'eau	Kaolinite des Eyzies (Ann. agron. 1947 p. 404)	Illite pure de W. O. Ress (Ann. agron. 1947 p. 408)	Argile 54	Argile 73	Argile 153	Argile 212
100°-400°	7,2	22,60	35,2	46,4	37,6	62,0
400°-650°	84,2	72,70	55,8	44,4	57,6	32,9
650°-1 000°	8,6	4,70	9,0	9,2	4,8	5,1
	100	100	100	100	100	100

Capacité d'échange de cations des argiles

Elles a été déterminée après percolation d'une solution d'acétate d'ammonium neutre et normale. Les résultats sont les suivants :

Échantillons	Capacité d'échange en meq. % grammes
n° 54.....	34,2
n° 73.....	35,7
n° 153.....	30,2
n° 212.....	39,7

Ces chiffres sont très voisins, ce qui confirme une fois de plus la similitude de composition du matériel argileux dans la région et il est remarquable de noter que la valeur la plus élevée caractérise le n° 212 uniquement formé d'Illite, la présence de Kaolinite diminuant classiquement la capacité d'échange dans les autres échantillons. Si l'on se réfère aux travaux de R. E. GRIM (1953), on peut exclure de façon certaine l'existence de la Montmorillonite et de la Vermiculite ayant des capacités d'échange très élevées. On pourrait songer à la chlorite où les mesures de cette valeur sont comparables à celle de l'Illite; mais les analyses chimiques totales permettent de lever facilement cette indétermination.

ANALYSES CHIMIQUES TOTALES

Elles ont été exécutées suivant la technique de P. LAPADU-HARGUES (1957) utilisée au laboratoire de Géologie et de Minéralogie de Clermont-Ferrand. Les résultats sont consignés dans le tableau 5.

TABLEAU 5

Constituants chimiques	Argile n° 54 Boulon An. n° 4 J. DEJOU Février 1962	Argile n° 73 Courgeon An. n° 5 J. DEJOU Février 1962	Argile n° 153 Les Badières An. n° 6 J. DEJOU Février 1962	Argile n° 212 Boulon An. n° 7 J. DEJOU Février 1962
H_2O^-	1,30	1,50	1,43	3,00
H_2O^+	10,03	11,29	10,60	10,13
SiO_2	46,80	45,46	45,31	43,70
Al_2O_3	27,30	25,57	26,98	16,69
Fe_2O_3	8,32	11,00	9,34	15,60
FeO	0,36	0,50	0,61	0,50
TiO_2	1,15	1,27	1,42	1,25
P_2O_5	0,11	0,21	0,24	0,40
MnO	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
CaO	0,70	0,60	0,28	0,56
MgO	1,35	1,33	1,20	1,30
K_2O	2,97	2,41	2,60	2,55
Na_2O	0,34	0,27	0,35	0,30
Total	100,73	101,41	100,36	98,98
Bases totales	5,36	4,61	4,43	4,71
SiO_2/R_2O_3	2,40	2,37	2,34	2,50
H_2O^+/R_2O_3	1,71	1,96	1,82	1,94
Bases/R_2O_3	0,25	0,23	0,21	0,26
Fe_2O_3/R_2O_3	0,16	0,22	0,18	0,33

$R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$

Ces analyses chimiques viennent confirmer, à la suite des déterminations passées en revue, l'étroite parenté du type minéralogique des quatre échantillons recueillis dans le Centre nivernais. La similitude est surtout étroite entre les trois

premiers, où notamment H_2O^-, SiO_2, Al_2O_3, K_2O et Na_2O sont très voisins, l'argile n° 212 se distinguant des autres spécimens par sa haute teneur en Fe_2O_3, comme l'avait montré l'analyse thermo-pondérale.

Ces compositions chimiques sont aussi beaucoup plus proches de celles des Illites que des Kaolinites, et s'apparentent assez bien aux types décrits dans l'Orain et la Grozonne (J. DEJOU et S. MÉRIAUX 1961). Toutefois, il faut signaler leur teneur relativement faible en K_2O : 2,97 p. 100 dans l'argile n° 54 la plus riche en cet élément alors que le taux moyen varie d'ordinaire entre 4,7 p. 100 et 6,9 p. 100 à la suite des observations de G. W, KUNZE et C. D. JEFFRIES (1952). Cependant, R. TORRENCE MARTIN (1954) lors d'une étude des minéraux argileux de cinq profils de l'État de New York, contenant de 50 à 80 p. 100 d'illite, associée au quartz et à la chlorite, indique des taux de K_2O oscillant entre 2,5 p. 100 et 3,2 p. 100 du même ordre par conséquent que nos propres résultats — ce qui semble indiquer que la teneur en cet élément peut présenter de très sensibles variations d'un échantillon à un autre.

L'examen des rapports moléculaires et leur comparaison avec ceux calculés par E. M. BASTISSE (1947) assigne également à ces argiles une identité de nature et les place très près du pôle illitique. Mais, comme pour les types de l'Orain, la somme des bases et le rapport Bases/R_2O_3 sont très peu élevés toujours à cause du faible pourcentage en K_2O.

Enfin, les analyses chimiques permettent d'exclure la présence de chlorite. En effet, R.E. GRIM (1953) a montré que pour ces minéraux, les teneurs en SiO_2 ne dépassent pas 32 p. 100 et que les taux de FeO étaient par contre très élevés.

ESSAI DE CALCUL DE LA COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES MÉLANGES ARGILEUX DU CENTRE NIVERNAIS A PARTIR DES ANALYSES CHIMIQUES TOTALES, DES EXAMENS AUX RAYONS X ET DES ANALYSES THERMO-PONDÉRALES

La détermination du pourcentage des constituants d'un mélange argileux est toujours une opération délicate et ne donnant que des résultats approchés. Dans le cas présent, s'il est assez aisé d'évaluer la composition de l'argile n° 212 d'Oulon, constituée simplement d'Illite et d'Oxyde de fer, les calculs deviennent par contre plus complexes pour les autres échantillons et par conséquent plus sujets à caution.

L'évaluation de la Gœthite ne peut être conduite à partir des courbes thermo-pondérales. En effet, nous ignorons la part de H_2O^-, abandonnée entre 280° et 400° revenant spécifiquement à ce minéral, une fraction de cette eau appartenant toujours à l'Illite qui, suivant les types, affecte un comportement variable. Le départ d'eau entre ces mêmes limites de température peut en effet se révéler très faible : c'est le cas d'une Illite de l'Illinois analysée par Mlle CAILLÈRE, ou au contraire accusé comme pour l'Illite de Fithian (Vermilion Country — États-Unis étudié par R. E. GRIM, R. H. BRAY et M. F. BRADLEY (1937) où la perte d'eau est de 2 p. 100 sur un total H_2O^+ = 8 p. 100. D'ailleurs, pour les quatre échantillons du Centre nivernais les calculs montrent bien que tout le Fe_2O_3 n'entre pas dans la constitution de la Gœthite.

Pour lever cette indétermination, l'oxyde de fer du mélange argileux auquel

nous avons attribué la formule la plus commune : Fe_2O_3 3/2 H_2O d'après J. JUNG (1958) a été évalué en dosant le fer libre (technique de DEB) : les résultats sont les suivants (tableau 6).

TABLEAU 6

Échantillon	Fer libre (%)	Teneurs en Fe_2O_3
54	3,28	4,70
73	6,55	9,35
153	4,66	6,65
212	9,48	13,50

Dès lors, le schéma, des calculs peut ainsi se résumer :

I. — *Argile n° 212 : Illite + Gœthite*

1°) Détermination de la teneur en gœthite à partir du fer libre, la fraction restante étant attribuée à l'Illite.

2°) Calcul pour cette Illite de sa nouvelle composition chimique, compte tenu des quantités de Fe_2O_3 et H_2O^- enlevées pour la formation de la Gœthite.

3°) Établissement à partir de cette composition de la formule structurale de l'Illite considérée comme relativement pure suivant la technique décrite par G. MILLOT (1949).

Les résultats enregistrés donnent les valeurs suivantes :

Composition du mélange p. 100 Gœthite : 15,7 (Fe_2O_3 = 13,5 — H_2O^+ = 2,2) (Illite : 84,3 p. 100

Composition calculée pour l'Illite 212 d'Oulon.

SiO_2	52,00
Al_2O_3	23,43
Fe_2O_3	4,35
MgO	1,55
CaO	0,66
Na_2O	0,36
K_2O	3,03
TiO_2	1,48
P_2O_5	0,47
H_2O^+	9,35
H_2O^-	3,57
Total	100,25

Formule structurale de l'Illite 212.

$$\begin{pmatrix} 0{,}07 & 3{,}55 & 0{,}38 & 10 \\ Ti & Si & Al & O \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1{,}54 & 0{,}23 & 0{,}16 \\ Al & Fe & Mg \end{pmatrix}(OH)^2\begin{pmatrix} 0{,}27 & 0{,}25 & 0{,}05 \\ K & Ca & Na \end{pmatrix}$$

II) *Argile 54—73—153 : Complexe Illite + Kaolinite + Gœthite*

1°) Détermination de la fraction de Gœthite,

2°) Cacul de la teneur en Illite, en supposant que sa formule structurale est la même que dans l'échantillon 212 ; ceci n'est pas rigoureusement exact, mais on peut

estimer, eu égard aux faibles variations enregistrées au cours de la mise en œuvre des techniques d'études antérieures que cette hypothèse de travail est valable avec une approximation acceptable.

3°) Calcul de la kaolinite restante.

Les résultats figurent dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Minéraux formés en %	Argile 54	Argile 73	Argile 153
Gœthite	5,42	10,90	7,70
Illite	79,20	65,0	67,8
Kaolinite	10,5	19,1	18,8

Conclusion et caractères généraux des argiles du centre nivernais

En conclusion, le matériel argileux de la région est constitué le plus souvent par un mélange d'Illite et de Kaolinite, le premier minéral étant nettement dominant dans tous les prélèvements, la Kaolinite disparaissant même complètement dans l'échantillon d'Oulon. Bien qu'un nombre insuffisant de fractions $< 2\,\mu$ ait été analysé, il est plausible de lier la présence de Kaolinite dans les n° 54 — 73 et 153 à la proximité du horst cristallin de Saint Saulge, altéré sur ses bordures, alors qu'à Oulon où l'on s'écarte du massif, ce minéral ne se décèle plus aux examens rœntgenographiques.

Les diverses caractéristiques physico-chimiques de ces argiles leur assignent une parenté marquée, ce qui confère à la région une certaine unité, alors que la pédologie nous la présente comme un district complexe et très varié.

Enfin l'examen des argiles rend compte de la compacité des sols, due à l'extrême finesse de leurs constituants, et explique également l'importance de certaines valeurs de K_2O échangeable dans plusieurs situations, où les apports sous forme d'engrais sont souvent limités.

Reçu pour publication en juillet 1963

SUMMARY

A STUDY OF FOUR SAMPLES OF THE CLAY FRACTION IN SOILS OF THE CENTRAL REGION OF NIÈVRE

In the central part of the Nièvre department, reposing on a sedimentary series of the Lias and mid-Jura, the clay fraction of soils generally consists of an association of illite, kaolinite and goethite, with illite predominating. The presence of kaolinite (10-20 p. 100 of the total minerals) is possibly associated with the crystalline horst of Saint-Saulge, since at a distance from this massif (Oulon n° 2, sample) this mineral does not occur in the mixture.

ZUSAMMENFASSUNG

ZUM STUDIUM VON VIER PROBEN DES TONANTEILS VON BÖDEN IM ZENTRALEN NIVERNAIS

Der Tonanteil der Böden im Zentrum des Département der Nièvre die auf einer sedimentären Serie des Lias und des mittleren Juras ruhen, besteht zu einem grossen Teil aus einer Assoziation von Illiten, Kaoliniten und Gœthiten, mit überwiegendem Anteil der ersteren in den untersuchten Proben. Es ist anzunehmen, dass die Gegenwart von Kaolinit (10-20 p. 100 des Gesamten) an den kristallinen Horst von St. Saulge gebunden ist, denn sobald man sich vom Gebirge entfernt, (Probe Oulon nº 2) findet man das Mineral nicht mehr im Gemenge vor.

РЕЗЮМЕ

Изучение четырех проб глинистой фракции почв центральной части района Нивернэ.

Ж. ДЭЖУ (Дижон).

Глинистый материал почв центральной части департамента Ниевр, покоющийся на седиментационной серии Лиаса и Средней Юры, составлен главным образом изсообществ Иллита, Каолинита и Гетита, при чем, первый из этих минералов преобладает в изследованных пробах. Связь присутствия Каолинита (от 10 %, до 20 % целого) с кристалическим горстом Сэн-Сожа — вероятна, ибо при удалении от массива (проба из Улона № 2), этот минерал исчезает из смеси.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASTISSE E. M., 1947. Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et terres de culture. 1er Mémoire. *Ann. agron.*, **17**, 398-454.

BONIFAS M., 1959. Contribution à l'étude géochimique de l'altération latérique. *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace,-Lorraine, Strasbourg*, nº **17**, 31-38.

DEJOU J., MERIAUX S., 1961. Étude des sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne (Jura). *Ann. agron.* **12**, 489-512.

GRIM R. E., BRAY R. H., BRADLEY W. F., 1937. The mica in argillaceous sediments. *Am. Minéral.*, **22**, 813-829.

GRIM R. E., 1953. *Clay Mineralogy*. Mc Graw Hill, Series in Geology.

JUNG J., 1958. *Précis de Petrographie*. Masson, Paris, 45.

KUNZE G. W., JEFFRIES C. D., 1952. X ray characteristics of clay minerals as related to potassium fixation Unpublished paper, presented before Section II. *Soil. Sci. Soc. America, Cincinnati, Ohio.*

LAPADU-HARGUES P., 1957. Methodes d'analyses des roches et minéraux des roches. *Trav. Labo. Géol. Minéral. Fac. Sc. Clermont Ferrand*, Série Doc., nº 7.

LUCAS J., CAMEZ Th., MILLOT G., 1959. Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. Carte Géol. Alace-Lorraine, Strabourg*, **12**, 2, 21-31.

MILLOT G., 1949. Relation entre la constitution et la génèse des roches sédimentaires argileuses. *Thèse Nancy*.

NUTTING P. G., 1943. Some standard thermal déhydration curves of minerals. *U. S. Geol. Survey Profess. Paper* 197 E, 197-216.

TORRENCE MARTIN R., 19 4. Clay minerals of five New York Soils profils. *Soil Sci.* **77**, 389-399.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 931-938

ESSAIS DE SIMPLIFICATION DES DOSAGES DES FORMES D'AZOTE (AMMONIACAL, NITRIQUE, URÉIQUE) DANS UN ENGRAIS LIQUIDE AZOTÉ

Rose MAZOYER

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes (Alpes-Maritimes)

SOMMAIRE

Les possibilités de séparation des cations et des anions à l'aide de résines synthétiques ont permis une mise au point de dosage simplifié des formes d'azote dans un engrais liquide composé de nitrate, d'ammoniaque et d'urée.

INTRODUCTION

L'apparition d'engrais liquides tant sur le marché américain qu'européen a obligé les chimistes à réviser les méthodes officielles de dosage des engrais. Dans la littérature spécialisée de ces dernières années, il est à remarquer une nette recherche de simplification dans les méthodes de dosage des formes d'azote de tels engrais, méthodes qui sont longues, difficiles et plus spécialement adaptées aux engrais complexes solides.

Nous avons été nous-mêmes appelés à doser les formes d'azote d'une solution azotée qui se composait essentiellement d'azote nitrique et ammoniacal venant du nitrate d'ammoniaque et d'azote uréique issu de l'urée. Profitant des énormes possibilités de séparation qu'offrent actuellement aux analystes les résines échangeuses d'ions, nous avons recherché dans ce domaine les possibilités de méthodes analytiques des différentes formes d'azote en présence.

Une première simplification a été faite à la suite d'un travail de DIMOTAKI-

KOURAKOU (1960) et d'une communication d'une méthode proposée par les Hollandais à la commission de l'O. E. C. E. « Determination of ammonia and urea in compound fertilizers » simplification qui portait sur une séparation de l'urée et de l'ammoniaque par une résine cationique d'acide fort. Cette séparation faite à partir d'une solution étalon dosant une quantité déterminée d'urée et d'ammoniaque s'est révélée extrêmement simple et précise.

Nous avons alors étudié la possibilité d'emploi de la méthode de dosage des nitrates proposée par SAMUELSON (1952), à savoir le dosage volumétrique de l'acide nitrique formé après passage sur une résine cationique qui retient le cation du nitrate. Les essais faits avec une solution étalon de NO_3NH_4 ont été parfaitement concluants.

Partant de ces données, il nous restait à faire les dosages des 3 formes d'azote sur un mélange NO_3NH_4-urée. Nous avons alors mis au point la méthode proposée ci-dessous. En marge de cette étude nous avons repris le problème du dosage de l'urée. Des études comparées des diverses méthodes proposées dans la littérature et en particulier celle de MORGAN (1958) et SMITH (1958), nous avons retenu celle à l'uréase avec une modification apportée par SLATER J. D. (1960) qui titre à pH 4,0 avec une solution titrée d'acide, l'ammoniaque libéré par l'uréase, le pH étant suivi au pH mètre.

PRINCIPE DE LA MÉTHODE

La séparation des anions NO_3^- et des cations NH_4^+ est réalisée en faisant passer la solution à doser sur une colonne de résine cationique type Dowex 50 × 8, 100-200 mesh. NH_4^+ est retenu sur la résine, NO_3^- passe en solution sous forme NO_3H, l'urée percole également sans être retenue sur la résine.

NO_3H est dosé volumétriquement par une solution titrée de NaOH donnant ainsi l'N nitrique de la solution à doser.

Après ce dosage, dans cette même solution, on dose l'urée par la méthode à l'uréase et NH_4OH ainsi libéré, est titré par SO_4H_2 potentiométriquement de préférence.

NH_4^+ est élué de la résine sur laquelle il était fixé lors du premier passage de la solution par HCl 4N et il est dosé par distillation après neutralisation de l'éluant.

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

APPAREILS

Colonne de verre avec robinet pour la séparation sur résine.

Hauteur de la colonne de verre : 17 cm environ, pHmètre, pipettes, burettes et ballons jaugés de haute précision.

RÉACTIFS

Dowex 50 × 8, 100-200 Mesh, HCl très pur 2N environ, HCl très pur 4N environ, soude 10N environ, SO_4H_2 N/10, NaOH N/10 titrée par SO_4H_2 N/10, Colorant Tashiro (bleu de méthylène, rouge de méthyl), MgO fraîchement calcinée.

PROTOCOLE

Dosage N nitrique

Diluer la solution à doser selon la valeur présumée en azote. Préparer une batterie de colonne de résine. Faire gonfler la résine 24 heures à l'eau déminéralisée. (Il faut de 2 à 3 cc de résine gonflée par colonne.) Mettre au fond de la colonne un peu de coton de verre. Introduire les 2-3 cc. de résine gonflée laisser la résine se tasser naturellement. Laver chaque colonne avec 20 cc HCl 2N. Puis avec 25 cc d'eau déminéralisée (vérifier après ce lavage que la solution ne contient plus de chlorures). Passer 5 cc de la solution à doser. Laver avec 50 cc d'eau. Recueillir l'éluant et l'eau de lavage dans une fiole large et fermant hermétiquement. (Nous utilisons à la Station des verres à moutarde avec leur couvercle en matière plastique souple). Ajouter 5 gouttes de réactif Tashiro. Titrer NO_3H par NaOH N/10.

Dosage N uréique

Cette solution, après le titrage de NO_3H, est amenée au pHmètre à pH = 4 par SO_4H_2 dilué (environ N/50) en agitant magnétiquement la solution. Ajouter 10 mg d'uréase (exactement pesée). (Uréase fournie par BIOLYON, [1]). Boucher le verre. Agiter quelques secondes sur l'agitateur magnétique. Mettre au bain-marie à 39° pendant 30 minutes. Laisser refroidir à la température ambiante 30 minutes. Doser l'azote ammoniacal formé par SO_4H_2 N/10 en ramenant le pH de la solution à 4,0 au pHmètre et en agitant magnétiquement. Le volume de SO_4H_2 N/10 nécessaire permet de calculer l'N de l'urée à doser. Faire un essai à blanc avec 10 mg d'uréase.

Dosage N ammoniacal

Placer une fiole Kjeldahl sous la colonne de résine après passage et lavage de la solution en vue du dosage de N nitrique. Faire passer sur la résine 50 cc HCl4N. Laver avec 50 cc d'eau déminéralisée. (La résine est de nouveau prête pour de nouveaux dosages.) Diluer la solution avec de l'eau déminéralisée. Ajouter, en refroidissant la fiole, 25 cc de soude environ 10 N. Ajouter 5 g de MgO. Distiller en recueillant le distillat dans 10 cc SO_4H_2N/10 en présence de 4 gouttes du colorant Tashiro (distiller environ 200 à 220 cc) Titrer par retour avec NaOH N/10.

RÉSULTATS

Les résultats obtenus à partir de l'engrais azoté liquide que nous avions à analyser sont consignés dans les tableaux suivants, chaque numéro correspond à une dilution de l'engrais à analyser.

[1] N. B. — Il convient de rappeler que l'uréase se comporte différemment selon la firme de fabrication.

TABLEAU I

Azote nitrique

N°	Azote NO_3 (g/l)	$\overline{X}$	$\pm \varepsilon$	$\overline{\varepsilon}^2$
1	94,45	94,28	0,17	0,028 9
2	94,17	94,28	0,11	0,012 1
3	94,45	94,28	0,17	0,028 9
4	94,17	94,28	0,11	0,012 1
5	94,17	94,28	0,11	0,012 1
6	94,17	94,28	0,11	0,012 1
7	94,17	94,28	0,11	0,012 1
8	94,45	94,28	0,17	0,028 9
9	94,45	94,28	0,17	0,028 9
10	94,45	94,28	0,17	0,028 9
11	94,08	94,28	0,20	0,040 0
12	94,08	94,28	0,20	0,040 0
13	94,64	94,28	0,36	0,129 6
14	94,08	94,28	0,20	0,040 0
15	94,36	94,28	0,08	0,006 4
16	94,25	94,28	0,03	0,000 9
17	94,25	94,28	0,03	0,000 9
18	94,25	94,28	0,03	0,000 9
19	94,25	94,28	0,03	0,000 9
20	94,26	94,28	0,02	0,000 4
$\Sigma =$	1 885,60		$\Sigma \varepsilon =$	0,465 0
$\overline{X} =$	94,28		$\sigma =$	$\sqrt{\frac{0,465\ 0}{19}}$
			$\sigma =$	$\sqrt{0,024\ 5}$

$\sigma =$ Écart type $\# 0,16$.

Coefficient de variation CV p. 100 $= \dfrac{0,16 \times 100}{94,28} \# 0,17$ p. 100.

$n = 20 \qquad t = 2,1$ il y a donc 95 p. 100 de chances pour que toute nouvelle mesure soit comprise dans l'intervalle :

$$93,96 < x_i < 94,60.$$

Écart type de la moyenne sur 20 mesures :

$$\frac{0,16}{\sqrt{20}} = \frac{0,16}{4,47} \# 0,036.$$

Il y a 95 p. 100 de chances pour que la valeur vraie soit comprise dans l'intervalle

$$94,20 < \mu < 94,36.$$

TABLEAU 2

Azote uréique

N°	Azote (urée) g/l	X	$\pm \varepsilon$	$\bar{\varepsilon}^2$
1	203,0	202,9	0,1	0,01
2	203,0	202,9	0,1	0,01
3	203,0	202,9	0,1	0,01
4	201,6	202,9	1,3	1,69
5	203,0	202,9	0,1	0,01
6	203,0	202,9	0,1	0,01
7	201,6	202,9	1,3	1,69
8	203,0	202,9	0,1	0,01
9	201,6	202,9	1,3	1,69
10	201,6	202,9	1,3	1,69
11	204,4	202,9	1,5	2,25
12	203,0	202,9	0,1	0,01
13	203,0	202,9	0,1	0,01
14	204,4	202,9	1,5	2,25
15	203,0	202,9	0,1	0,01
16	203,0	202,9	0,1	0,01
17	203,0	202,9	0,1	0,01
18	203,0	202,9	0,1	0,01
19	203,0	202,9	0,1	0,01
20	203,0	202,9	0,1	0,01
$\Sigma =$	4 057,2		$\Sigma\bar{\varepsilon}^2 =$	11,40
$\bar{X} =$	202,9		$\sigma \# \sqrt{\frac{11,40}{19}} = \sqrt{0,60}$	

σ = Écart type # 0,78.

Coefficient de variation CV p. 100 $= \frac{0,78 \times 100}{202,9} \# 0,38$ p. 100.

Il y a 95 p. 100 de chances pour que toute nouvelle mesure soit comprise entre :

$$201,3 < x_i < 204,5.$$

Écart type de la moyenne sur 20 mesures :

$$\frac{0,78}{\sqrt{20}} = \frac{0,78}{4,47} = 0,17,$$

Il y a 95 p. 100 de chances pour que la valeur vraie soit comprise entre :

$$202,5 < \mu < 203,3.$$

TABLEAU 3

Azote ammoniacal

N°	Azote NH_4 (g/l)	$\overline{X}$	$\pm\ \varepsilon$	$\overline{\varepsilon}^2$
1	96,6	96,6	0	0
2	95,2	96,6	1,4	1,96
3	96,6	96,6	0	0
4	96,6	96,6	0	0
5	96,6	96,6	0	0
6	96,6	96,6	0	0
7	96,6	96,6	0	0
8	96,6	96,6	0	0
9	96,6	96,6	0	0
10	96,6	96,6	0	0
11	97,44	96,6	0,84	0,7056
12	97,44	96,6	0,84	0,7056
13	96,6	96,6	0	0
14	95,2	96,6	1,4	1,96
15	96,6	96,6	0	0
16	95,67	96,6	0,93	0,8649
17	97,1	96,6	0,5	0,25
18	97,1	96,6	0,5	0,25
19	97,1	96,6	0,5	0,25
20	97,1	96,6	0,5	0,25
$\Sigma =$	1 931,95		$\Sigma\ \overline{\varepsilon}^2 =$	7,1961
$\overline{X} =$	96,6		$\sigma = \sqrt{\frac{7,1961}{19}}$	
			$\sigma = \sqrt{0,3787}$	$\sigma \# 0,62$

σ = Écart type = 0,62

Coefficient de variation CV p. 100 $= \dfrac{0,62 \times 100}{96,6} \# 0,64.$

Il y a 95 p. 100 de chances pour que toute nouvelle mesure soit comprise entre :

$$95,3 < x_i < 97,9.$$

Écart type de la moyenne de 20 mesures :

$$\frac{0,62}{\sqrt{20}} = \frac{0,62}{4,47} \# 0,14.$$

Il y a 95 p. 100 de chances pour que la valeur vraie soit comprise dans l'intervalle

$$96,3 < \mu < 96,9.$$

Les possibilités de séparer quantitativement, grâce à une résine synthétique, les ions NH^{4+} des ions NO^{3-} d'une part et l'urée d'autre part ont permis dans ce cas particulier d'engrais liquides azotés une résolution facile du problème généralement complexe du dosage des formes d'azote. Les résultats obtenus, les faibles taux des coefficients de variation qui en résultent permettent de conclure qu'il y a toujours intérêt à simplifier les problèmes en isolant, quand cela est possible, l'élément à doser.

Reçu pour publication en avril 1963.

SUMMARY

INVESTIGATIONS ON THE SIMPLIFICATION OF NITROGEN DETERMINATIONS (AMMONIA, NITRATE, UREA) IN LIQUID NITROGEN FERTILIZER

Quantitative separation of NH_4 and NO_3 ions from urea by means of a synthetic resin facilitates the generally complex problem of determining different forms of nitrogen. The low coefficients of variation obtained in the determinations suggest that there is scope for simplifying procedures by separating, whenever possible, the element to be determined.

ZUSAMMENFASSUNG

VERSUCHE ZUF EINFACHEREN DOSIERUNGEN DER STICKSTOFFORMEN (AMMONIAK, SALPETER, HARNSTOFF) IN FLÜSSIGEM STICKSTOFFDÜNGER

Die Möglichkeit, NH_4^+ Ionen von NO_3^- Ionen einerseits und von Harnstoff andrerseits durch synthetische Harze zu trennen, gestattete in diesem besonderen Falle mit flüssigem Stickstoffdünger das sonst sehr komplexe Problem der Stickstofformen leicht zu lösen. Die erzielten Resultate der schwache Satz der Variationskoeffizienten zeigen, dass es immer von Interesse ist, die Probleme zu vereinfachen, indem man, wo immer möglich, das zu dosierende Element isoliert.

РЕЗЮМЕ

Опыт упрощения дозировок различных форм азота (аммиачной, нитратной, мочевинной) в жидком азотистом удобрении.

РОЗА МАЗУАЙЕ (Антиб).

Возможности количественного отделения ионов NH_4 от ионов NO_3 с одной стороны, и мочевины — с другой, при помощи синтетической смолы, позволили, в данном случае жидких азотистых удобрений, легкое разрешение обычно сложной задачи дозировки различных форм азота. Полученные результаты, малые коэффициенты вариаций из них вытекающие, позволяют заключить о всегдашнем интересе упрощения, при помощи изоляции, когда только это возможно, элемента, который желательно дозировать.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DIMOTAKI-KOURAKOU V., 1960. *Ann. Fals. Exp. chim.*, 337-348.
MORGAN W. A., HARFORD E. F., 1958. *J. A. O. A. C.*, **3**, 637-659.
SAMUELSON O., 1952. *Ion Exchanges in analytical chemistry*, Stockolm, p. 117.
SALTER J. D., HILL J. S., SESSO D. C., 1960. *J. Agr. Food. Chem.*, **8**, 3, 175-178.
SMITH J. A., DOCK D. G., et *al.*, 1958. *J. Agr. Food Chem.*, **6**, 587-588.
Méthode proposée à l'O. E. C. E : Determination of ammonia and urea in compound fertilizers.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 939-950

CONTRÔLE ANALYTIQUE DES CHAUX VITICOLES PAR THERMOGRAVIMÉTRIE

R. GUENNELON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, Montfavet (Vaucluse)

SOMMAIRE

La technique thermogravimétrique (enregistrement continu des variations de poids lors du chauffage d'une substance), s'applique aux mélanges CaO-$Ca(OH)_2$-CO_3Ca, que constituent les chaux viticoles pour sulfatages. On détermine ici les conditions de chauffage à réaliser pour que chaque réaction (déshydratation de la chaux éteinte et dissociation du carbonate) soit terminée avant que la suivante ne débute. Ce travail ne constitue pas une étude théorique du système, mais une mise au point pratique de la technique à utiliser, dans des conditions déterminées.

I. INTRODUCTION

Le problème de l'analyse élémentaire d'un mélange contenant à la fois le carbonate, l'oxyde et l'hydroxyde d'un métal alcalino-terreux, ne présente pas de difficultés majeures par voie chimique, puisqu'il se ramène au dosage de l'ion M^{++}, de l'anion CO_3^{--} et des molécules H_2O. En fait, certaines hypothèses complémentaires sont nécessaires pour établir un résultat en CO_3M, MO, $M(OH)_2$ et humidité.

La thermogravimétrie apporte à ce problème une solution élégante, donnant à l'appui du dosage un document enregistré. Il est toutefois possible d'effectuer, comme il sera dit plus loin, une telle analyse sans disposer pour autant d'un appareil à enregistrement continu par pesée.

Le principe consiste à obtenir par chauffage, la réalisation successive des réactions suivantes:

$$Ca(OH)_2 \rightleftarrows CaO + \nearrow H_2O \qquad (1)$$

$$CO_3Ca \rightleftarrows CaO + \nearrow CO_2 \qquad (2)$$

avec estimation de la perte de poids subie par l'élimiation de H_2O et CO_2, et déplacement total de l'équilibre vers la droite.

La méthode sera particulièrement adaptée au contrôle des chaux viticoles dont les constituants principaux sont l'oxyde et l'hydroxyde de calcium et le carbonate.

II. DISSOCIATION DE CO_3Ca

Elle fut étudiée par DEBRAY (1867) qui définit cette réaction comme un système univariant à deux constituants en 3 phases (CaO et CO_2-CO_3 Ca sol. CaO sol., CO_2 gaz). A chaque température, correspond une tension de dissociation exprimée par la pression de gaz carbonique ; sous la pression atmosphérique, la dissociation ne sera donc complète que lorsque cette tension atteindra une atmosphère, ce qui se produit à une température de 800° environ. SMITHS et ADAM (1923), indiquent 897° et LE CHATELIER (1904), 815°.

Dans le vide, SOSMAN, HOSLETTER et MERVIN (1915), ont montré qu'une dissociation lente s'effectuait dès 410° et RICHER et VALLET (1953), indiquent 500° dans un courant d'azote. On a montré que dans l'air, cette dissociation pouvait se fixer vers 670-680°, et que la présence d'impuretés abaissait cette température (GUENNELON, 1957). Les travaux les plus récents, montrent que cette réaction débute effectivement vers 360°, pour une tension de 1 mm de mercure.

a) *Durée de réaction à poids constant, à t° variable*

En soumettant 500 mg. de CO^3Ca à une pyrolyse complète, à des températures variables, la durée de réaction totale dans un courant d'azote pur de 0,8 l/minute, est donnée dans le tableau 1 (fig. 1)

TABLEAU I

Durées de réactions à diverses températures (CO_3Ca)

Durée de réaction θ en mn	Température t^o	Produit $\theta \times t$
60	715	$42{,}8 \times 10^3$
89	695	$61{,}9 \times 10^3$
186	683	127×10^3
205	668	$136{,}9 \times 10^3$
260	660	$171{,}5 \times 10^3$
456	635	$289{,}2 \times 10^3$

Si l'on porte en abscisses, θ, et $\theta.t$ en ordonnées, on obtient une droite D_1 (fig. 2), d'équation $\theta \cdot t = t^o \cdot \theta + K'$.

On en déduit : $t^o \# 618^o$

$$\text{et } \theta = \frac{K'}{t^o - 618}.$$

Cette équation indique que *dans les conditions de l'expérience,* la dissociation n'est possible qu'au-dessus de 618°, qui représente dès lors la température de début,

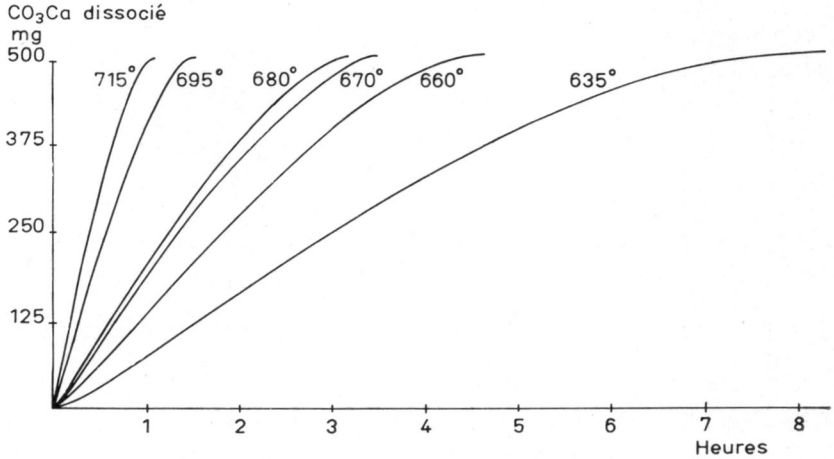


FIG. 1. — *Pyrolyse de 500 mg de CO_3Ca à diverses températures*

température pour laquelle la réaction a une durée infinie. La précision est suffisante pour fixer les conditions de travail pour les déterminations sur les chaux viticoles.

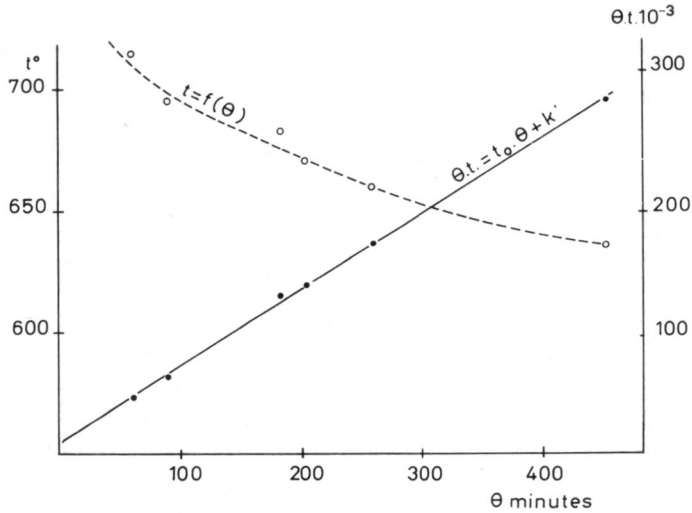


FIG. 2. — *Variations de la durée de réaction (dissoc. de CO_3Ca), en fonction de la température*

b) *Durée de réaction à température constante*

D'autre part, en fixant la température à 683° ± 1°, on a enregistré la pyrolyse de quantités croissantes de CO_3Ca à partir de 100 mg (fig. 3). La durée de réaction complète est donnée au tableau 2.

Traçons les courbes $\theta = f(p)$ et $\log \theta = g(\log p)$ (fig. 4.).
Cette dernière courbe est une droite d'équation.

$$\log \theta = \log K'' + n \log p.$$

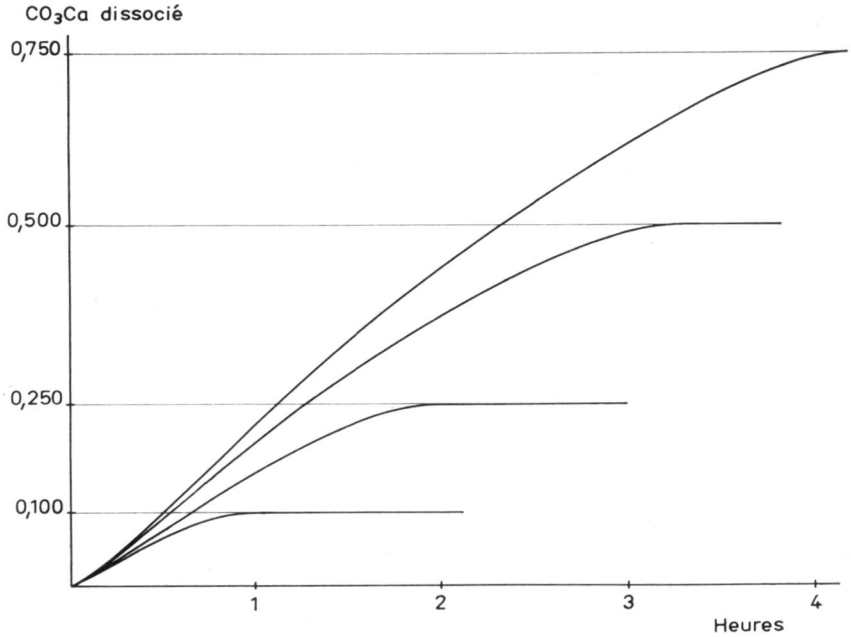


FIG. 3. — *Pyrolyse de quantités croissantes de CO_3Ca à une même température*

TABLEAU 2

Durées de réactions pour divers poids (CO_3Ca)

Poids en mg p	Durée en mn θ	$\text{Log}_{10}\ p$	$\text{Log}_{10}\ \theta$
100	60	2	1,778 1
250	112	2,397 9	2,049 2
500	186	2,698 9	2,269 5
750	248	2,875 0	1,394 4

On mesure sur la courbe : $n = 0{,}71$;

$$\log K'' = 0{,}36 \pm 0{,}01$$

d'où $$K'' = 2{,}29 \pm 0{,}06.$$

On en déduit :

$$\boxed{\theta = 2{,}3 \times p^{0{,}71}}$$

où p représente le poids de substance en mg et θ, en minutes, le temps nécessaire à l'achèvement de la réaction.

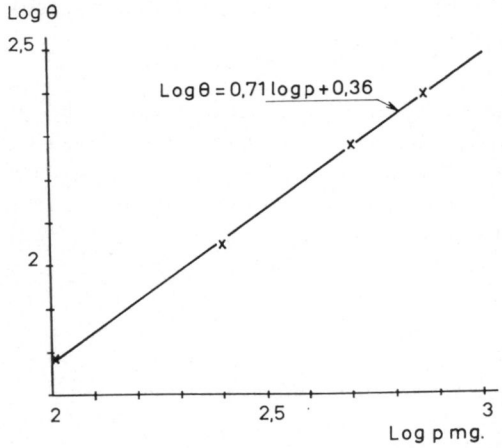


FIG. 4. — *Variations de la durée de réaction (dissoc. de CO_3Ca), en fonction de la quantité initiale de produit*

III. DISSOCIATION DE $Ca(OH)_2$

Le système $Ca(OH)_2$ — CaO — H_2O vap. est analogue au système précédent, et il existe une relation entre la température et la pression de la vapeur d'eau. D'après PASCAL, citant divers auteurs, cette relation donne les résultats numériques du tableau 3.

TABLEAU 3

Tensions et températures de dissociation

Tension de dissociation en mm de Hg	9,2	31,5	92	234	526	760
Températures en degrés						
JOHNSTON	369	408	448	488	527	547
LE CHATELIER	—	—	—	—	—	—
DRÄGERT	336	365	417	—	—	—

Dans un courant d'air sec, on note 490° et GILL (1934), cité par Mlle GIBAUD et M. GELOSO (1954) admet 520°.

De l'ensemble de ces données, on peut admettre que la déshydratation intervenant vers 500°, on pourra à cette température et sous la pression atmosphérique, amener à son terme la réaction de départ d'eau.

Mais comme dans l'air et à cette température, la réaction aboutit à un équilibre dont l'état final n'est atteint que très lentement, le déplacement de l'équilibre vers la droite s'obtiendra en évacuant, au fur et à mesure de sa production, la vapeur d'eau dégagée, c'est-à-dire, en opérant dans un courant gazeux inerte et sec.

Cinétique de la réaction.

L'étude des courbes gravimétriques de thermodissociation à température constante t, peut permettre de prévoir les meilleures conditions opératoires (fig. 5). Sur une telle courbe isotherme, on peut calculer la vitesse de réaction (quantité de chaux dissociée pendant un temps déterminé). Si l'on porte alors les vitesses ainsi calculées en fonction d'une certaine expression du temps, on définira une constante de vitesse pour la température à laquelle on a opéré :

$$v = \frac{dx}{d\theta} = f(K,\theta)$$

avec « dx » quantité dissociée pendant le temps « dθ ».

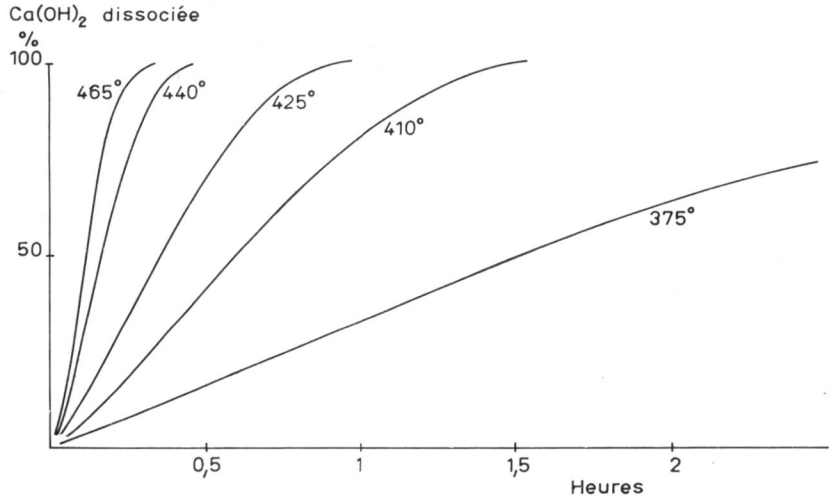


FIG. 5. — *Déshydratation de $Ca(OH)_2$ à températures constantes*

Si l'on porte en ordonnées la valeur $(x_0 - x)$, (x et x_0 étant les quantités de produit dissociées au temps θ et à la fin de la réaction), et en abscisses $\sqrt{\theta}$, le graphique est une droite de pente a (fig. 6).

On peut donc écrire :

$$x_0 - x = a\sqrt{\theta} + b.$$

Au temps $\theta = o$, $x = o$, donc $b = x_0$

$$x = \sqrt{\theta}$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{a}{2\sqrt{\theta}}\frac{dx}{d\theta} = \frac{a^2}{2x} = \frac{a^2}{2}x^{-1}.$$

La constante de vitesse K est donc égale à $a^2/2$.

Lorsqu'on la calcule pour diverses températures, la représentation, log K en fonction de $\frac{1}{T\ °K}$ est une droite, dont la pente permet de calculer l'énergie d'activation apparente E*a* pour cette réaction hétérogène. En effet :

$$K = A \cdot e^{\frac{-E}{RT}}$$

$$\log_{10} K = \log_{10} A - 0{,}43429 \frac{Ea}{R} \frac{1}{T}.$$

La pente est proportionnelle à E*a* que l'on peut ainsi évaluer graphiquement.

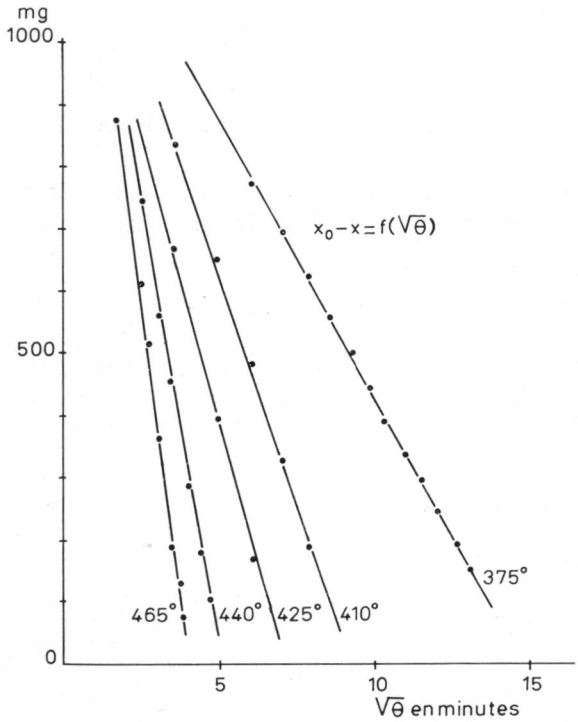


FIG. 6. — *Représentation de* $(x_0 - x) = a\sqrt{\theta} + b$ (*déshydratation de* $Ca(OH)^2$)

Ces données devraient permettre la prévision des réactions et la fixation des conditions opératoires. Toutefois, cette énergie d'activation peut varier selon l'énergie d'activation de la réaction de surface. Cette réaction peut dépendre des impuretés du produit commercial à analyser, du degré de finesse, du tassement, etc.

On a préféré, en utilisant des courbes obtenues pour la déshydratation de 1 g de chaux pure (ce qui correspond dans le mode opératoire décrit plus loin, à un produit commercial à 80 p. 100 de pureté), établir une relation entre la température de l'isotherme et le temps θ mis, pour mener à terme la réaction.

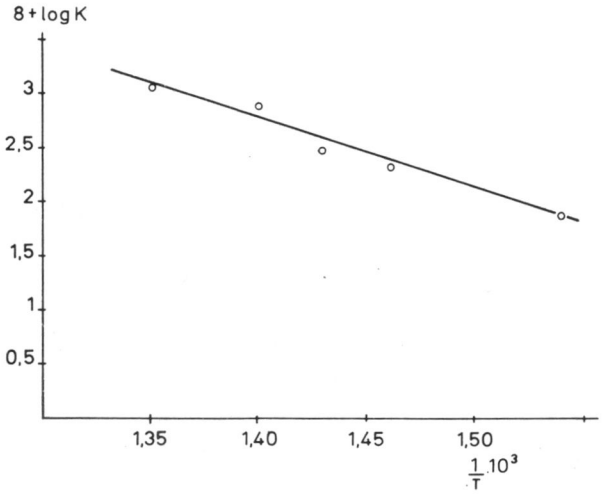


FIG. 7. — *Graphique d'Arrhenius pour la déshydratation de $Ca(OH)_2$*

On peut représenter (fig. 8), le temps θ en fonction de la température t°C de l'isotherme. La courbe exploitant les résultats du tableau 4, peut se présenter sous la forme de :

$$\theta = f\left(\frac{1}{t - t_0}\right).$$

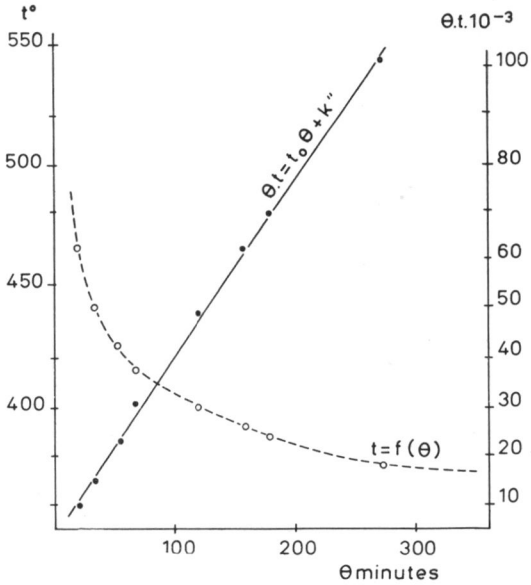


FIG. 8. — *Variations de la durée de déshydratation de $Ca(OH)_2$ en fonction de la température*

Si l'on porte θ en fonction du produit θ × t, on obtient une droite d'équation :

$$\theta \cdot t = t_0 \cdot \theta + K'''.$$

La pente de cette droite détermine t^o et l'ordonnée à l'origine donne K'''.

La durée de réaction complète pour un gramme de chaux et un courant gazeux de 0,8 l/minute, sera donnée par :

$$\theta \text{ mn} \# \frac{4 \times 10^3}{t - 362}.$$

Si, par exemple, on effectue un palier de température à 410°C, la réaction sera achevée au bout de 84 minutes.

TABLEAU 4

Durées de réactions à diverses températures ($Ca(OH)_2$)

θ minutes	t^o degrés	Produit $\theta \times t$
20	465	$9{,}3 \times 10^3$
32	440	14×10^3
53	425	$22{,}5 \times 10^3$
75	415	$31{,}1 \times 10^3$
123	400	$49{,}2 \times 10^3$
160	391	$62{,}6 \times 10^3$
180	388	$69{,}8 \times 10^3$
272	275	102×10^3

A une température inférieure à 362°, la durée de réaction sera infinie, et on pourra effectuer d'autres paliers de t^o plus basse, pour déterminer par exemple l'humidité du produit.

IV. APPLICATION AUX CHAUX VITICOLES

Les résultats ainsi obtenus, permettent de fixer les meilleures conditions pour obtenir la composition exacte des chaux destinées à l'agriculture.

a) *Déshydratation de $Ca(OH)_2$*

Les courbes de la figure 5 et les résultats du paragraphe III, montrent qu'en choisissant une température voisine de 465°, 1 gramme de $Ca(OH)_2$, est dissocié en 20 minutes environ. A cette température, la dissociation de CO_2Ca est très lente, voire même impossible dans les conditions de la manipulation, puisqu'elle ne commence avec une vitesse notable que vers 620°. Il est évident que l'on pourrait obtenir des résultats différents en faisant varier le tassement de la poudre dans le creuset, la vitesse du courant de gaz inerte et la matière première du creuset. La question de tassement est, par elle-même primordiale et explique certaines anomalies dans l'alignement des points sur les courbes. Il est préférable, pour obtenir des conditions

assez reproductibles, d'éviter le tassement lors de la pesée de la prise d'essai et d'utiliser la plus large capsule possible, eu égard aux dimensions de la chambre de chauffe. Pour les essais à l'aide de la thermobalance, on est malheureusement assez limité dans le choix de la capsule, la chambre de chauffe n'ayant qu'un diamètre de 25 mm environ. Le courant gazeux choisi, correspond à une vitesse de 0,8 litre/minute pour un volume de chauffe de 0,7 l environ.

En définitive, les conditions suivantes ont été choisies :

a) Montée à 105° en 30 minutes

b) Palier à 105° en 90 minutes (humidité) ;

c) Montée à 475° en 90 minutes ;

d) Palier à 475° en 150 minutes (déshydratation de $Ca(OH)_2$) ;

e) Montée à 980° en 120 minutes (dissociation de CO_3Ca).

La durée totale de l'analyse est de 480 minutes (8 heures). On peut observer avant le début de la déshydratation de la chaux (360°), une légère inflexion que l'on rapporte à la présence de $Mg(OH)_2$. Des doses importantes de CO_3Mg ou $(CO_3)_2$ MgCa seraient dissociées en même temps que serait déshydratée $Ca(OH)_2$ et leur détermination n'est pas possible de cette manière.

En définitive, les pertes de poids (p_1, p_2, p_3, p_4), mesurées au bout de 2 heures 3 heures, 6 heures et 8 heures, correspondent respectivement à H_2O^-, H_2O de la magnésie hydratée, H_2O de la chaux éteinte et CO_2 du carbonate de calcium.

On aura les relations suivante :

$$Mg\ (OH)_2 = p_2 \times 3{,}24,\ Ca(OH)_2 = p_3 \times 4{,}116,\ CO_3Ca = p_4 \times 2{,}274.$$

b) *Détermination de la chaux non éteinte*

La fabrication à partir du calcaire, par calcination dans les fours à chaux, suivie de l'extinction de la chaux vive, peut donner un produit contenant une certaine quantité de chaux non éteinte. Pour accéder à sa détermination, il est nécessaire, de réhydrater cette chaux, en évitant la carbonatation. Pour cela, un certain poids de chaux, environ 3 g, est placée dans un erlenmeyer de 300 cc, contenant 150 à 200 cc d'eau permutée bouillie. Cet erlenmeyer est maintenu à 80° environ et relié à un réfrigérant aboutissant à une fiole à vide, elle-même en communication avec une petite trompe ou pompe à vide. La réhydratation est ainsi menée en l'absence de CO_2 et l'eau vient se condenser dans la fiole à vide. Le produit est ainsi séché à 80°. On le broye et on effectue une thermogravimétrie sur 1,250 g comme pour le produit initial. On déduit ensuite facilement les diverses teneurs en CaO, $Ca(OH)_2$ et CO_3Ca.

V. CONCLUSION

La technique ainsi précisée, permet depuis quatre ans le contrôle, à la fabrication et à la vente, des chaux viticoles pour sulfatage par enregistrement thermogravimétrique. La méthode présente l'avantage d'être entièrement automatique et de ne requérir aucune surveillance : elle laisse un document photographique ou enregistré suivant le type du matériel utilisé.

Elle peut être utilisée sans enregistrement, en effectuant des pesées après chaque palier de température indiqué au paragraphe IV-B. Il suffit pour cela de disposer d'un four à enceinte de dimensions moyennes, dans lequel on ménage une entrée une sortie pour le courant gazeux inerte, destiné à l'évacuation progressive des produits des dissociations. Ce courant gazeux (azote pur) passe auparavant dans une solution potassique de pyrogallol, servant à absorber l'oxygène de l'azote (impuretés) et sur une colonne de chaux vive pour le sécher.

La précision obtenue est de l'ordre de + 0,5 p. 100 pour CO_3Ca et + 0,2 p. 100 pour $Ca(OH)_2$.

Reçu pour publication en juin 1963.

SUMMARY

THE ANALYTICAL CONTROL BY THERMOGRAVIMETRY OF LIME USED IN VITICULTURE

The dissociation of $CaCO_3$ under the effect of heat, with a finely ground product placed into a conical crucible of 1.7 cm depth and 1.3-2.4 cm diameter, starts around 618°C in a current of 0,8 l/min. nitrogen.

The dissociation of $Ca(OH)_2$ is nearly finished at this temperature (618°C). Its dehydratation under similar conditions as above, starts around 362°C, and at 410°C it is finished in 84 minutes for 1 gram hydrated lime.

Consequently, thermogravimetry is suitable for the study and control of viticultural limes containing about 90 p. 100 $Ca(OH)_2$, 0 to 6-7 p. 100 $CaCO_3$ and 0 to 3-4 p. 100 CaO.

The temperature records at levels of 105° and 475°C and a temperature increase to 980°C show the moisture content of the product, the removal of H_2O from $Ca(OH)_2$ and that of CO_2 from $CaCO_3$.

When the product is rewetted under vacuum, the CaO form may be determined by a second operation.

Between 105° and 360°C, temperature levels recorded may be due to the presence of small amounts of $Mg(OH)_2$ which can also be estimated by this means.

The completely automatic technique provides a record which may be used as a certificate of the control.

ZUSAMMENFASSUNG

ANALYTISCHE UNTERSUCHUNG DES DÜNGEKALKS FÜR REBEN DURCH THERMOGRAVIMETRIE

Die Zerlegung des CO_3Ca, unter Einwirkung der Hitze beginnt, wenn das Produkt fein gemahlen in einen konischen Tiegel kommt (Tiefe 1,7 cm Durchmesser 1,3 & 2,4 cm) bei 618°, mit N-Zufuhr von 0,8 l/min. Die Reaktionsdauer ist proportional zur Menge der Substanz.

Die Dissozierung von $Ca(OH)_2$ ist weitgehend beendet, wenn diese Temperature (618°) erreicht ist. Unter den gleichen Bedingungen wie die vorhergehenden beginnt der Wasseraustritt gegen 362°. Bei 410° ist er für 1g gelöschten Kalkes in 84 Minuten beendet.

Düngerkalk für Reben enthält ugf 90 p. 100 $Ca(OH)_2$, 0 bis 7-7 p. 100 CO_3Ca und 0 bis 3-4 p. 100 CaO, und kann durch Thermogravimetrie untersucht werden.

Temperaturstufen bei 105°, 475° und ein Ansteigen bei 980° zeigen die Feuchtigkeit des Produktes, den Austritt von H_2O aus $Ca(OH)_2$ und von CO_2 aus CO_3Ca an.

Unterwirft man das Produkt einer Rehydrierung unter Wakuum, so kann ein zweites Operieren den in Form von CaO vorliegenden Kalk feststellen.

Zwischen 105° und 360° konnen die festgestellten Stufen geringen Mengen von $Mg(OH)_2$ zugeschrieben werden, die man auf diese Weise feststellt.

Das Interesse dieser vollautomatischen Technik beruht auf der Registrierung eines Dokumentes, das für die Untersuchungsanalysen massgebend ist.

РЕЗЮМЕ

Аналитический контроль извести для виноградников при помощи термогравиметрии.

Р. ГЕННЕЛОН (Монфавэ).

Если поместить мелко смолотый CO_3Ca в струю азота 0,8 л-мин в тигеле формы усеченного конуса 1,7 см глубины (диаметр 1,3 и 2,4 см), то распадение этого продукта под влиянием тепла, начинается при температуре около 618°. Длительность реакции-пропорциональна количеству вещества.

При достижении температуры в 618° распадение $Ca(OH)_2$ уже совершенно закончено.

При соблюдении вышеуказанных условий, обезвоживание 1 грамма гашеной извести начинается при достижении температуры около 362° и заканчивается при 410°, длясь всего 84 минуты.

Таким образом, возможно изучать и подвергать проверке при помощи термогравиметрии, известь для виноградников содержащую приблизительно 90 % $Ca(OH)_2$, от 0 до 6-7 % CO_3Ca и от 0 до 3-4 % CaO.

Ступени температур в 105°, и 475° с повышением до 980° демонстрируют степень различной влажности продукта, испарения воды из $Ca(OH)_2$ и исчезновения углекислоты из CO_3Ca.

Если снова увлажнить продукт в безвоздушной среде, то повторная операция позволит определение извести фигурировавшей в форме CaO.

Ступени зарегистрированные в промежутке между температурами в 105° и 360°, вызваны по всей вероятности присутствием в извести $Mg(OH)_2$, количества которого можно таким образом определить.

Интерес этого технического приема заключается в его полной автоматизации; кроме того, после него остается зарегистрированный документ служащий доказательством при контрольных анализах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GIBAUD (Mlle), GELOSO, 1954. Application de la thermobalance au dosage d'un mélange de CaO-MgO-CO_3Ca et de la dolomie. *Chim. Anal.*, **36**, 153-158.

GUENNELON, 1957. Application de la thermogravimétrie à l'étude de sols carbonatés. *Chim. Anal.*, **39**, 317-358.

PASCAL, 1934. *Traité de Chimie Minérale.* Masson, Paris. Cités dans PASCAL :

DEBRAY, 1867. *C. R. Ac. Sci.*, **64**, 603.

DEBRAY, 1868. *C. R. Ac. Sci.*, **66**, 194.

GILL, 1934. *Canad. J. Res.*, **10**, 703-712.

LE CHATELIER, 1904. *C. R. Ac. Sci.*, **102**, 1243.

SMITHS, ADAMS, 1923. *J. Amer. Chem. Soc.*, **45**, 1167.

SOSMAN, HOSLELLER, MERVIN, 1915. *Washington Acad. Sci.*, **5**, 563.

RICHER, VALLET, 1953. Étude de la pyrolyse de la dolomie dans l'azote et le CO_2 en température linéairement croissante. *Rev. Metall.*, **50**, 597-602.

THEROND, 1957. Essais expérimentaux sur la carbonatation des chaux pour sulfatage. *Ann. Fals. Fraudes*, 581/582, 212-219.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 951-965

LES ACIDES ORGANIQUES DANS LA FEUILLE DE VIGNE

J. DELMAS, N. POITOU, B. LEVADOU
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, Pont-de-la-Maye (Gironde)

SOMMAIRE

L'étude des conséquences de diverses alimentations sur le développement végétatif de la Vigne a conduit les auteurs à étudier en détail un groupe chimique important : celui des acides organiques, plus particulièrement dans la feuille.

Dans le but de montrer l'influence des éléments de la fumure sur la biochimie de la Vigne, les auteurs ont étudié la composition de la feuille à différents stades de la croissance en ce qui concerne les divers acides organiques.

La plupart des travaux antérieurs portent sur la composition du raisin. Très peu d'informations ont été recueillies sur la variation de la composition de la feuille dans le temps et en fonction de divers facteurs du milieu.

Grâce aux méthodes chromatographiques, une recherche systématique et quantitative des acides organiques dans la feuille de vigne a pu être poursuivie.

MATÉRIEL ET TECHNIQUES

A. Prélèvements

Les échantillons sont prélevés sur la vigne en place, en choisissant la 2e feuille d'un rameau fructifère sur des pieds choisis dans une parcelle délimitée, homogène quant au sol, au cépage et à la technique culturale.

Les dates de prélèvement sont choisies en fonction du stade physiologique de la plante et s'échelonnent pendant toute la durée de la végétation, soit de la mi-avril (très jeunes feuilles) à la mi-octobre (juste avant la chute des feuilles).

Trois cépages ont été testés : *Merlot*, *Cabernet* et *Baco 22 A*.

Dans les résultats qui suivent, il est fait état spécialement du *Merlot* sur lequel les études ont été plus complètes.

B. Dosage des acides organiques

Deux méthodes d'analyse par chromatographie sur colonne ont été utilisées.

Les échantillons sont d'abord préparés : 50 grammes de feuilles fraîches sont débarrassées de leurs nervures principales et du pétiole.

Une première extraction est faite à l'alcool à 96°.

Une seconde à l'alcool à 60°.

Une troisième à l'eau en présence de Dowex 50 afin d'obtenir les acides salifiés.

Les extraits obtenus sont purifiés par élimination des cations et acides aminés sur Permutite 50.

L'extrait purifié est alors séparé en deux fractions, l'une pour la séparation sur colonne de silice, l'autre pour la séparation sur Dowex.

a) *Sur gel de silice.*

Les acides organiques sont fixés sur Amberlite IRA 400, puis élués par du carbonate d'ammonium et enfin concentrés sous vide.

Ces acides sont alors séparés par chromatographie sur colonne de silice par passage de 6 mélanges éluants de butanol-chloroforme, de polarité croissante.

La séparation des acides est obtenue par un collecteur de fractions, celles-ci étant dosées ensuite par titration à la soude N/200 en présence de rouge de phénol.

b) *Sur résine Dowex* 1 préparée sous forme de formiate.

Les acides sont fixés sur Dowex et élués par gradient régulier d'acide formique.

Chaque fraction recueillie est séchée à l'étuve à vide à 40°C puis titrée après reprise à l'eau comme dans le cas a).

Les deux méthodes se recoupent et se complètent : certains acides non élués sur Dowex (oxalique par exemple) le sont sur silice, et réciproquement les acides shikimique et quinique masqués par la trop grande quantité d'acide tartrique dans la première méthode sont très bien séparés sur Dowex.

L'identification des acides élués est obtenue ou simplement confirmée par chromatographie sur papier en chambre thermostatée.

Par ailleurs, il est fait mention dans cette note de l'*acidité totale* qui correspond à l'acidité de titration des extraits obtenus après leur passage sur Permutite 50 en amenant ces extraits à pH 8,3 avec NaOH N/10. On a ainsi les acides organiques et minéraux libres et salifiés, sauf la 3e fonction de l'acide phosphorique.

Enfin la somme des divers acides dosés au cours de l'élution fournit l'*acidité organique*.

RÉSULTATS

Les résultats sont rapportés :

I — l'acidité totale : à la matière sèche ;

II — l'acidité organique : à la matière sèche et à l'acidité totale ;

III — les divers acides : à la matière sèche et à l'acidité organique.

I. — *Acidité totale*

Dans le tableau 1, on a groupé les résultats concernant l'acidité totale (organique et minérale, libre et salifiée) pour les années 1960 et 1961 aux divers stades végétatifs (cépage *Merlot*) sur des parcelles provenant de zones de sols nettement différenciés (1960) ou recevant des traitements (fumure) divers.

Les chiffres montrent un *maximum* d'acidité qui se situe en général entre le début de la formation des raisins et le début de la maturation.

L'amplitude des variations reste constante quelle que soit l'année ou la parcelle considérée : 150-250 milliéquivalents pour les valeurs extrêmes relevées (moyenne des minima 160, des maxima 230), pour 100 grammes de matière sèche.

TABLEAU I

	Acidité totale (libre + salifiée) (titration à pH 8,3) en méq % de matière sèche				
	1960 saison humide		1961 saison sèche		
	1	2	2	$E_{55}P_0$	$E_{17}P_2$
Début de végétation					
14/4	—	—	168,1	172,6	172,9
25/4	151	168	—	—	—
5/5	—	—	195,3	181,5	178,2
Floraison					
30/5-1/6	205,6	190	191,6	180,8	177,7
Début de formation des raisins					
16/6	189,4	192	—	—	—
22/6	—	—	253,1	183,3	175,3
Raisins formés					
8/7	252	213,3	—	—	—
12/7	—	—	190,8	194,1	231,5
Véraison					
27/7	218,4	218,5	—	—	—
3/8	—	—	196,4	199,4	238
Maturation					
24/8-26/8	214,7	212,9	244,8	187,6	213,3
Vendanges					
15/9	216,8	214	221,9	227,7	206,1
Tombée des feuilles					
5/10	—	—	230,3	213,6	193,9
13/10	180	187,2	—	—	—

On notera par ailleurs que les analyses effectuées sur *Baco 22 A* (atteint de Flavescence dorée) fournissent des valeurs, au 1er juillet, de 150 à 170 méq. Enfin celles relatives au *Cabernet Franc* (jeune vigne) sont en 1962 pour le début de floraison : 140 méq ; pour le début de maturation : 230 méq.

Les valeurs obtenues pour les minima ou les maxima sont donc identiques pour les différents cépages. Il semble que ces chiffres constituent une caractéristique de la feuille de vigne, susceptibles de faibles variations en fonction des conditions du milieu ou de la nature du cépage.

Par contre, on observe des variations importantes quant à l'époque où le maximum est atteint, variations pouvant être liées aux conditions climatiques (saison

sèche ou humide) ou de terrains (fertilité, profondeur). Cet aspect du problème sera étudié dans les recherches ultérieures.

II. — *Acidité organique*

Dans le tableau 2 sont rassemblés les résultats concernant l'acidité organique mesurée dans la feuille de vigne.

On observe une variation dans le même sens que pour l'acidité totale, avec une valeur maximale entre la floraison et la maturation des raisins.

TABLEAU 2

	Acidité organique dosée									
	1960				1961					
	1		2		2		$E_{55}P_0$		$E_{17}P_2$	
	méq. % ac. totale	méq. % M. S.	méq. % ac. totale	méq. % M. S.	méq. % ac. totale	méq. % M. S.	méq. % ac. totale	méq. % M. S.	méq. % ac. totale	méq. % M. S.
Début de végétation										
14/4	—	—	—	—	70,9	119,2	76,9	132,9	76,9	132,8
25/4	66,4	100	67,5	113,5	—	—	—	—	—	—
5/5	—	—	—	—	68,7	134	71,5	129,7	62,8	111,9
Floraison										
30/5-1/6	67,8	140	80,2	152,3	78,1	149,8	72,4	130,9	71,4	126,7
Début de formation des raisins										
16/6	76,5	141,7	80,6	154,8	—	—	—	—	—	—
22/6	—	—	—	—	69,3	175,6	61,6	113,1	66,1	115,7
Raisins formés										
8/7	77,5	194,4	71,9	153,4	—	—	—	—	—	—
12/7	—	—	—	—	68,1	130,1	66,7	129,1	63,6	147,2
Véraison										
27/7	63,6	138,8	73,3	160,3	—	—	—	—	—	—
3/8	—	—	—	—	68,9	135,3	72,9	145,5	74,9	178,2
Maturation										
24/8-26/8	71	150,2	73,7	157	77,2	188,9	73,9	138,7	75,3	160,8
Vendanges										
15/9	77,6	168,3	75	160,5	78,4	174	77,1	175,6	78,4	161,7
Tombée des feuilles										
5/10	—	—	—	—	76,0	174,8	75,3	—	84,9	164,6
13/10	81,4	146,5	72,8	136,2	—	—	—	160,9	—	—

Pour le *Merlot,* la valeur varie de 100-130 méq par rapport à la matière sèche au début de la végétation à 150-200 au maximum pour se stabiliser entre 140 et 170 en fin de végétation.

TABLEAU 3

	Acide tartrique									
	1960 Année humide				1961 Année sèche					
	1		2		2		$E_{55}P_0$		$E_{17}P_2$	
	méq. % Ac. org.	méq. % M. S.	méq. % Ac. org	méq. % M. S.	méq. % Ac. org.	méq. % M. S.	méq. % Ac. org.	méq. % M. S.	méq. % Ac. org.	méq. % M. S.
Début de végétation										
14/4	—	—	—	—	58,2	69,4	59,3	78,9	58,9	78,4
25/4	52,5	52,6	57,3	65,1	—	—	—	—	—	—
5/5	—	—	—	—	69,4	93,1	65,2	84,7	71,2	79,5
Floraison										
30/5-1/6	65,6	91,2	65,7	100	57,6	86,3	65	85,2	64,4	81,8
Début de formation des raisins										
16/6	59,6	86,5	60,4	93,6	—	—	—	—	—	—
22/6	—	—	—	—	67,1	117,9	70,2	79,6	67,1	77,8
Raisins formés										
8/7	57,6	108,3	60,6	93	—	—	—	—	—	—
12/7	—	—	—	—	61,8	80,4	60,3	78,2	62,4	92,5
Véraison										
27/7	64,9	90,1	59,5	95,3	—	—	—	—	—	—
3/8	—	—	—	—	61,9	83,9	59,6	86,6	55,8	99,4
Maturation										
24/8-26/8	62,5	94,1	63,4	99,4	57,3	108,2	57,6	79,9	55,8	89,8
Vendanges										
15/9	57,5	96,8	55,3	88,3	56,2	97,8	57,1	100,2	61,6	99,4
Tombée des feuilles										
5/10	—	—	—	—	58,2	101,7	56,9	91,5	62,8	103,2
13/10	50,8	74,4	53,9	73,3	—	—	—	—	—	—

Cette acidité représente de 65 à 85 p. 100 de l'acidité totale (80 p.1 00 dans le cas du *Baco 22 A* en juillet).

Il semble que la grande variation observée selon l'année et qui se fait sentir en fin juillet, soit due essentiellement aux conditions climatiques. Ceci se traduit par une acidité organique plus élevée pendant l'été en année humide.

III. — *Les acides organiques*

A) *Les courbes de séparation* par fractions présentées ci-dessous montrent la prédominance, dans tous les cas, des trois acides *oxalique, malique* et *tartrique,* quels que soient le cépage, le stade physiologique de la plante, l'année et les conditions climatiques.

TABLEAU 4

	Acide malique									
	1960 Année humide				1961 Année sèche					
	1		2		2		$E_{55}P_0$		$E_{17}P_2$	
	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.
Début de végétation										
14/4	—	—	—	—	14,0	17	17,6	23,6	20,4	27,1
25/4	24,5	24,5	24,1	27,3	—	—	—	—	—	—
5/5	—	—	—	—	16,1	21,9	17,6	22,7	16,8	18,7
Floraison										
30/5-1/6	18,7	25,3	22,8	34,7	24,0	35,8	18,6	24,3	23,6	29,7
Début de formation des raisins										
16/6	23,2	33,7	27,5	43,1	—	—	—	—	—	—
22/6	—	—	—	—	24,6	43,6	18,5	21	24,5	28,4
Raisins formés										
8/7	31,1	58,5	27,9	42,8	—	—	—	—	—	—
12/7	—	—	—	—	31,9	41,5	28,8	37	32,6	47,9
Véraison										
27/7	29,7	41,3	29,6	47,3	—	—	—	—	—	—
3/8	—	—	—	—	25,9	35,1	26,4	38,3	30,3	54,1
Maturation										
24/8-26/8	32,1	48,2	27,0	42,4	30,8	58,2	33,6	45,7	30,9	49,7
Vendanges										
15/9	30,8	51,8	33,3	53,3	33,3	57,9	31,3	55	32,5	52,7
Tombée des feuilles										
5/10	—	—	—	—	36,7	64,1	36,3	58,2	31,6	52
13/10	42	61,5	41,1	56,0	—	—	—	—	—	—

Ces 3 acides principaux représentent 90-95 p. 100 de l'acidité organique. Si ce total varie peu, par contre les proportions relatives des 3 acides qui le constituent varient beaucoup, notamment selon le stade physiologique de la plante.

Sur les tableaux 3, 4, 5, ont été portés les résultats de cinq séries de prélèvements effectués à différents stades en cours de végétation, en nous référant d'une part à l'acidité organique, de l'autre à la matière sèche.

TABLEAU 5

	Acide oxalique									
	1960				1961					
	1		2		2		$E_{55}P_0$		$E_{17}P_2$	
	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.
Début de végétation										
14/4	—	—	—	—	19,6	23,3	15,5	20,7	13,1	17,4
25/4	13,6	13,5	10,1	11,5	—	—	—	—	—	—
5/5	—	—	—	—	9,3	12,4	10,1	13	8,1	9,6
Floraison										
30/5-1/6	9,3	13	3,9	5,9	11,8	17,4	10,7	13,9	6,7	8,6
Début de formation des raisins										
16/6	9,6	14	0,8	1,3	—	—	—	—	—	—
22/6	—	—	—	—	2,5	3,5	6	6,8	2,2	2,5
Raisins formés										
8/7	3,7	6,6	4,8	7,4	—	—	—	—	—	—
12/7	—	—	—	—	6,1	0,2	1,1	1,6	0,5	0,6
Véraison										
27/7	1,7	2,3	3,2	5	—	—	—	—	—	—
3/8	—	—	—	—	5,7	7,5	8,6	12,5	7,2	12,8
Maturation										
24/8-26/8	0,6	0,9	5,4	8,5	4,9	9,1	3,3	4,6	7,9	12,6
Vendanges										
15/9	5,0	8,5	4,1	6,5	4,2	7,2	3,4	6	0,2	0,3
Tombée des feuilles										
5/ 10	—	—	—	—	0	0	0,1	0,2	0	0
13/10	0,4	0,6	0,1	0,1	—	—	—	—	—	—

L'examen d'ensemble de ces tableaux montre que si une grande variation est certaine, on peut néanmoins dégager les faits suivants :

1°) par rapport à l'acidité organique, le taux *d'acide tartrique* diminue en cours d'année, alors que l'on constate une augmentation continue pour *l'acide malique*. Il y a une opposition presque parfaite des courbes du tartrique et du malique ;

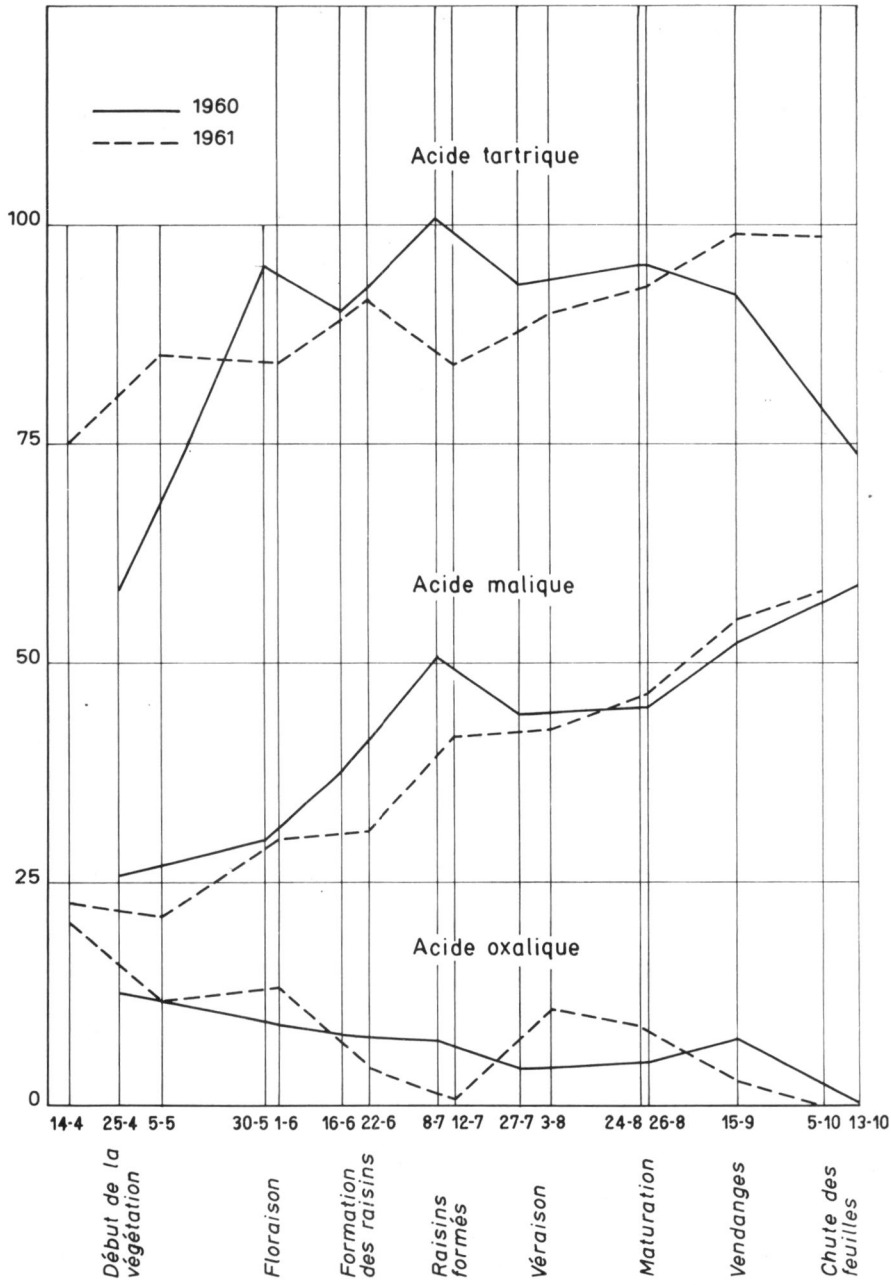


FIG. 1. — *Courbes moyennes de variation annuelle des acides organiques de la Vigne (en méq p. 100 de M. S.)*

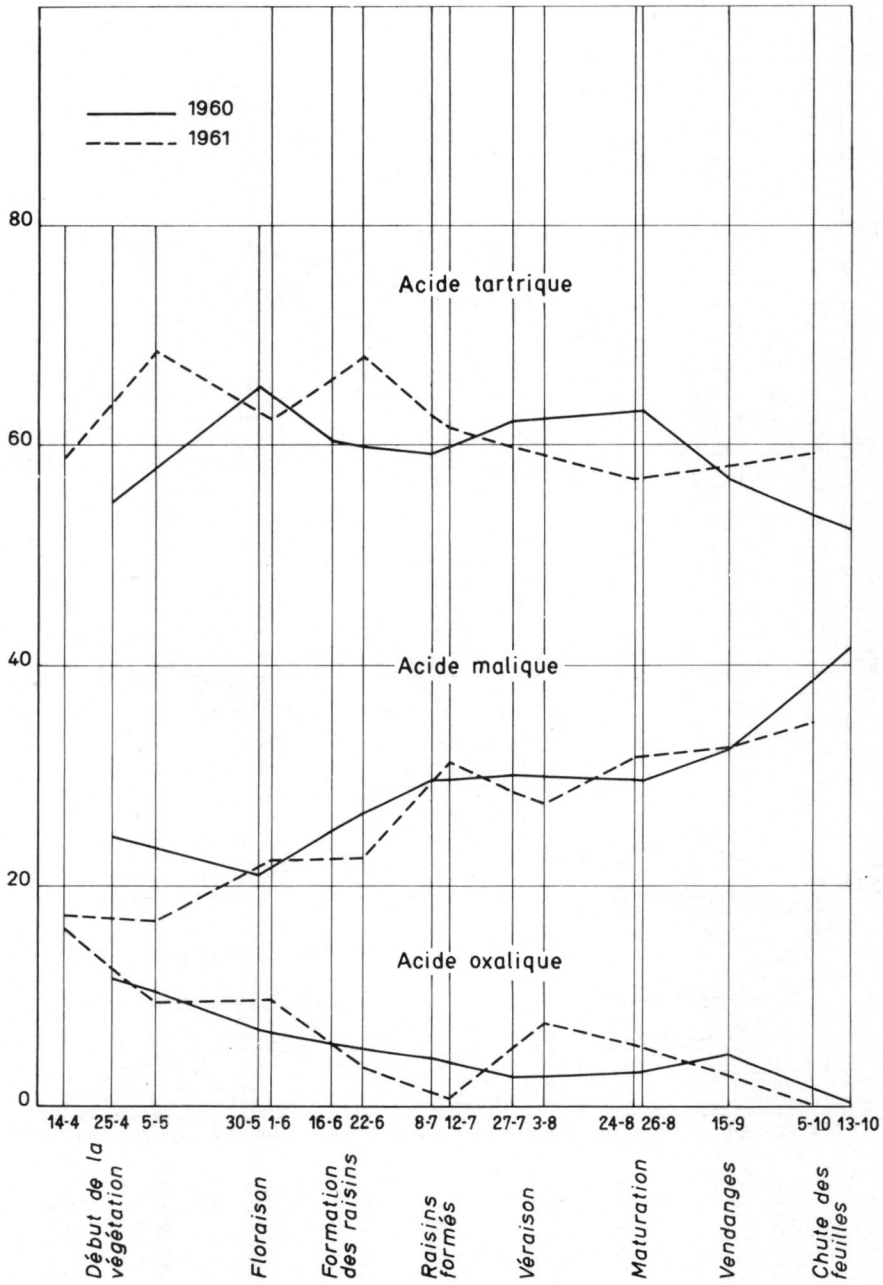


FIG. 2. — *Courbes moyennes de variation annuelle des acides organiques de la Vigne (en méq p. 100 de l'acidité organique)*

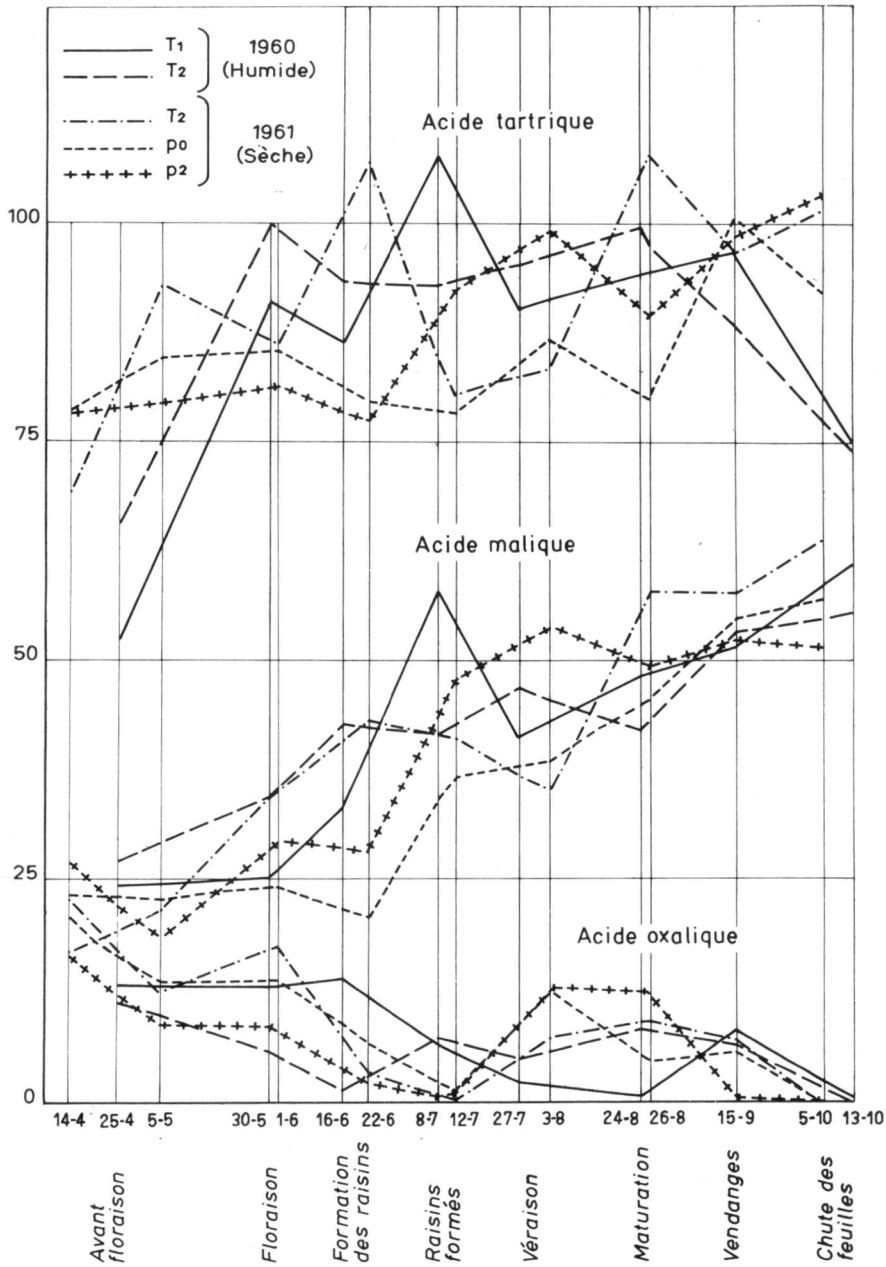
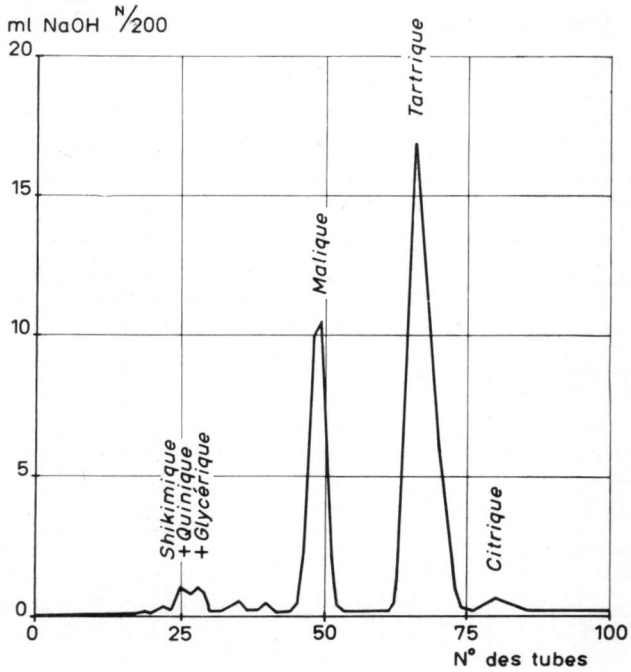
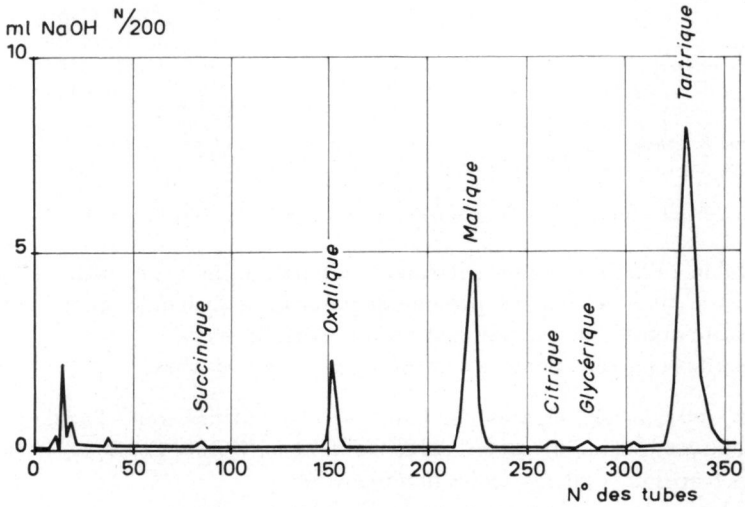


FIG. 3. — *Courbes de variation annuelle des acides organiques de la Vigne (en méq p. 100 de M. S.)*



Elution sur DOWEX 1



Elution sur silice

FIG. 4. — *Courbes de séparation des acides organiques*

2°) par rapport à la matière sèche, les différences paraissent très grandes d'une année à l'autre pour l'acide tartrique, alors que les courbes sont très voisines pour l'acide malique ;

TABLEAU 6

	1961 — Merlot — La Tresne 2					
	Succinique		Citrique		Quinique + Glycérique	
Dates	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.	méq. % ac. org.	méq. % M. S.
Début de végétation						
14/4/61	1,4	1,7	1,4	1,7	4	4,9
5/5	0,8	0,8	0,9	1,2	2,6	3,3
Floraison						
1/6/61	0,5	0,7	2,1	3,3	3,4	4,9
Début de formation des raisins						
22/6	0,5	1	0,8	1,4	3,4	6,2
Raisins formés						
12/7	0,5	0,6	1	1,3	3,9	5,1
Véraison						
3/8	0,5	0,9	1,9	2,6	3,1	4,3
Maturation						
24/8	0,6	1	2	3,6	3,4	6,4
Vendanges						
14/9	0,6	1	1,5	2,5	3	5,3
Tombée des feuilles						
5/10	0,6	1,1	1,8	3,1	2,4	4,2

3°) l'acide *oxalique* décroît nettement à partir d'un taux initial identique à celui de l'acide malique, jusqu'à presque disparaître de la feuille, aussi bien par rapport à l'acidité organique que par rapport à la matière sèche.

Les résultats moyens annuels sont groupés sur les courbes 1 et 2.

B) *Les autres acides* séparés par l'analyse et identifiés sont : l'acide *fumarique*, l'acide *succinique*, l'acide *citrique*, l'acide *shikimique*, l'acide *quinique*, l'acide *glycérique* et des traces de 3 autres acides non identifiés.

Parmi les acides ainsi séparés, les acides citrique, succinique, quinique et glycérique se présentent sous des taux non négligeables (ex. 1961 parcelle 2, tabl. 6)

On note que l'acide *citrique* augmente en cours de végétation, comme l'ont signalé E. PEYNAUD et A. MAURIE, parallèlement à l'acide malique. Ceci apparaît encore plus nettement par rapport à la matière sèche.

L'acide succinique a un taux dégressif avec des fluctuations importantes en végétation.

Les acides *quinique + glycérique*, dont la séparation est difficile, présentent des variations selon le stade de végétation avec un maximum fréquent entre véraison et maturation. Le taux final est voisin du taux initial.

Les autres acides sont décelables à l'état de traces à certaines périodes : le *fumarique* et le *shikimique* sont toujours présents au début de végétation et disparaissent plus ou moins tôt en saison.

Variations obtenues en fonction des conditions du milieu.

Les familles de courbe 3 montrent en se référant à la matière sèche que l'*amplitude* des variations d'une part et l'époque de l'apparition des minima ou des maxima, d'autre part, dépend de la situation de la parcelle, de sa fertilité naturelle ou entretenue et des conditions climatiques de l'année.

Ainsi pour l'acide tartrique, en année sèche ($T_2 61$), un décalage est observable dans le sens de la précocité pour notamment les premières oscillations de la courbe (1 maximum, 1 minimum) par rapport à l'année humide ($T_2 60$ et $T_1 60$).

En année humide (1960), on constate par ailleurs que la parcelle située en position basse ($T_2 60$) (sol sableux lessivé de pente) ne présente pas de maximum à la formation des raisins, alors que cette même parcelle en année sèche ($T_2 61$) donne une courbe analogue — *mais décalée dans le temps* — fournie par la parcelle située en position haute ($T_1 60$) (sol peu profond, graves de plateau sur sous-sol plus ou moins consolidé).

En ce qui concerne l'influence éventuelle des fumures, on notera que la parcelle NK(P_0) présente des courbes pour les différents acides nettement différentes de celles offertes par NPK(P_2) (les traitements différents $P_2O_5 = 0$ et $P_2O_5 = 200$ consistant en une localisation d'engrais tous les 2 ans).

En particulier la quantité d'*acide malique* p. 100 de la matière sèche est nettement inférieure, pendant la saison végétative, dans les feuilles des vignes ne recevant pas de fumure phosphatée.

CONCLUSION

Par cette étude, les auteurs ont voulu préciser la nature de l'acidité organique de la vigne et montrer en particulier comment évoluaient, pendant la croissance de la plante, les taux des divers acides dans la feuille.

Ils ont montré l'importance de 3 acides essentiels, mais ont également signalé la présence et le type d'évolution de plusieurs autres.

Ces études constituent, dans l'esprit des auteurs, un préambule à la recherche de l'influence de certaines conditions du milieu (fertilisation notamment) sur la biochimie de la plante et une contribution à l'étude de la filiation des acides organiques.

Reçu pour publication en juin 1963.

SUMMARY

THE ORGANIC ACIDS IN THE LEAVES OF GRAPE VINE

The organic acids in fertilized grape vine at different stages of growth were studied by means of chromatography.

The evolution with time of tartaric, malic and oxalic acids, the three principal acids present, is discussed. Other acids, such as fumaric, succinic, citric, quinic, shikimic and glyceric acids, were also present in lower concentrations.

Observations showed that organic acidity varied parallelly with total acidity, tartaric acid decreased during the season and malic acid increased to an almost identical degree, and oxalic acid decreased until complete disappearance.

The curves of organic-acid evolution showed certain shifts according to climate, especially rainfall during the growth season, and according to the nutrient reserves in the soil and fertilizers applied.

The studies were conducted both in the field and under controlled nutrient conditions.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE ORGANISCHEN SÄUREN DES REBENBLATTS

Die Autoren untersuchten mittels Chromatographie die organischen Säuren des Rebenblattes in den verschiedenen Vegetationsstufen und in Verbindung mit der Düngung.

Sie stellten die drei wichtigsten Säuren fest : Wein-, Apfel-und Oxalsäure und bestimmten ihre zeitliche Entwicklung.

Auch wurde die Gegenwart anderer Säuren mit geringerem Satz bemerkt : Fumar-, Citronen, Chinin-, Shikimi - und Glycerinsäuren.

Die Autoren bemerkten eine gleichlaufende Änderung der organischen und totalen Acidität, ein Abnehmen der Weinsäure im Laufe des Jahres und ein Zunehmen der Apfelsäure (nahezu perfekter Gegensatz der 2 Kurven), endlich ein Abnehmen der Oxalsäure bis zum vollständigen Verschwinden

Andrerseits stellten sie einige Verschiebungen der Entwicklungskurven fest, in Abhängigkeit vom Klima, insbesondere von der Regenmenge während der Wachstumsperiode, in Abhängigkeit von den Nährstoffreserven des Bodens und von der Düngung.

Diese Untersuchungen wurden gleichzeitig im Feld und im Labor ausgeführt.

РЕЗЮМЕ

Органические кислоты виноградного листа.

Ж. ДЭЛЬМАС, Н. ПУАТУ и Б. ЛЕВАДУ. — Бордо.

При помощи хромотографии, авторы изучили органические кислоты виноградного листа в разные эпохи вегетационного периода и в связи с внесением удобрений.

Они отметили присутствие трех главных кислот : винной, яблочной и щавелевой, и уточнили процесс их эволюции с течением времени.

Указали они также на присутствие в гораздо меньших количествах и других кислот : фумаровой, янтарной, лимонной, хинной и глицериновой.

Замечены были также параллельные изменения органической и общей кислотности, уменьшение количества винной и увеличение содержания яблочной кислот в течении года (почти точная оппозиция двух кривых), и, наконец, прогрессивное и, в конечном итоге, полное, исчезновение щавелевой кислоты.

Авторы констатировали кроме того некоторое расхождение эволюционных кривых зависящее от климата, в частности от количества осадков выпавших в период роста лозы, а также и от питательных запасов почвы или рода удобрения.

Изучение продолжается, как в полевых условиях, так и в условиях контролируемой среды.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Méthodes et chromatographie.

BOVE-RAVEUX, 1957. *Bull. Soc. Chimie France.*

COÏC Y., LESAINT C., LE ROUX F., 1961. Comparaison des feuilles, entre-nœuds et nœuds du blé au point de vue acides organiques et cations minéraux. *Ann. Physiol. vég.*, **3**, 33-37.

FAUCONNEAU G., 1958. Les acides organiques des plantes fourragères. *Ann. Physiol. vég.*, 1, 1-14.

LESAINT C., ROUX, 1959. Mise au point d'une technique de détermination des acides organiques chez les végétaux. *Ann. Physiol. vég.* 83-92.

Acides organiques de la Vigne.

CARLES J., Mlle ALQUIER, BOUFFARD A., 1962. Les acides organiques de la vigne et leurs gradients. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 925-927.

DELMAS J., POITOU N., BATS J., 1961. Détermination chromatographique des variations quantitatives des principaux acides organiques de la feuille de Vigne. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 1018-1020.

DELMAS J., POITOU N., LEVADOU B., 1961. Étude des acides organiques de la Vigne. 33 *Congrès. Chim. Industr.*, 28 sept-8 oct. 1961.

DUPUY P., 1960. Le métabolisme de l'acide tartrique. *Ann. Technol.*, **9**.

GENEVOIS L., MAURIE A., PEYNAUD E., RIBEREAU-GAYON J., 1954. Évolution des acides organiques chez la Vigne. 8e *Congr. Intern. Bot.*, Paris, C. R. sect 11 et 12 p. 36.

HALE C. R., 1962. Synthèsis of organic acids in the fruit of the Crop. *Nature*, 917.

PEYNAUD E., 1958. Évolution des acides organiques et des amino-acides du raisin. *Bull. Soc. Phys. vég.*, **4**, 34.

PEYNAUD E., MAURIE A., 1958. Synthèse des acides tartrique et malique chez la Vigne. *Amer. J. Enology* **9**, 32

RIBEREAU-GAYON G., 1959. Sur la genèse des acides organiques dans la Vigne. *C. R. Ac. Sci.*, **248**, 3606-9.

RIBEREAU-GAYON G., 1959. Sur l'évolution des acides organiques et des cations dans les organes de la Vigne. *C. R. Acad. Sci.* 3481.

RIBEREAU-GAYON G., 1961. Recherches sur les acides organiques de la Vigne. *Ve Congr. Intern. Bioch.*, Moscou.

STAFFORD H. A., LOEWUS F. A., 1958. The fixation of $C_{14}O_2$ into tartaric and malic acids of excised grape leaves. *Plant Physiol.*, **33**, 194-99.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 967-998

L'AÉRATION DU SOL.

Mise au point bibliographique

M. VILAIN

Station agronomique de l'Aisne, Laon

SOMMAIRE

Cette étude envisage le comportement de l'oxygène dans l'atmosphère du sol, en rapport avec es différentes phases du milieu. D'après des renseignements bibliographiques, on expose les données sur les méthodes de mesures, la composition, et les variations. L'importance de l'oxygène pour le développement du végétal et des micro-organismes est ensuite analysée.

PLAN

Introduction

A — L'oxygène en milieu poreux

1°) Caractéristiques d'un milieu poreux.
2°) Les différents états de l'oxygène
3°) La diffusion de l'oxygène dans le milieu poreux
4°) Mesures

B — L'oxygène dans le sol

1°) Caractéristiques de l'atmosphère du sol
2°) L'oxygène dans les différentes phases
3°) Schéma d'oxygénation proposé
4°) Caractéristiques du sol en rapport avec l'aération

C — L'oxygène dans la plante

1°) Rôle de l'oxygène dans le métabolisme de la plante
2°) L'oxygène et la morphologie
3°) Zone exploitée par la racine
4°) L'oxygène et l'activité métabolique

D — L'oxygène et l'activité des microorganismes

1°) Rôle de l'oxygène
2°) La flore du cycle de l'azote
3°) Dénitrification et réorganisation
4°) Dégradation de la matière organique

Conclusions

INTRODUCTION

L'importance de l'aération du sol pour le développement des végétaux et de la vie microbienne a été reconnue depuis fort longtemps. Les premiers chiffres concernant l'atmosphère du sol ont été publiés en 1853 par BOUSSINGAULT et LEWY.

On a longtemps considéré que la composition était peu différente de celle de l'atmosphère extérieure. Ainsi, sans admettre une constance absolue puisque l'oxygène est consommé et le gaz carbonique produit, certains auteurs pensent que les variations sont trop faibles pour entraîner une quelconque action. D'autres, au contraire admettent que les variations sont très importantes, très brutales et susceptibles d'influencer très fortement les conditions de nutrition de la plante. Ces contradictions semblent liées aux méthodes de mesures et traduisent les difficultés rencontrées dans une telle étude.

Grâce à de nouvelles méthodes, la question est de nouveau envisagée par de nombreux auteurs, en particulier LEMON et WIEGAND, qui paraissent remettre en cause une partie des résultats déjà obtenus, ceci pour tenir compte de progrès effectués dans d'autres domaines de la physique du sol.

C'est pourquoi, il nous est apparu opportun d'entreprendre cette mise au point bibliographique qui n'a d'autre but que de montrer le comportement de l'oxygène dans le sol et de mettre en évidence son rôle et son importance, en abordant très rapidement la manière dont les résultats ont été obtenus.

Après avoir rappelé les caractéristiques d'un milieu poreux et le comportement de l'oxygène dans ce cas, l'étude de l'aération du sol sera envisagée en insistant plus particulièrement sur le mécanisme de l'oxygénation et les relations avec les caractéristiques du sol. Pour terminer cette mise au point, on envisagera les relations entre l'oxygène et l'activité de la plante et des micro-organismes.

A — L'OXYGÈNE EN MILIEU POREUX

1°) *Caractéristiques d'un milieu poreux*

Un milieu poreux est constitué par un substrat divisé. Il résulte d'un arrangement de particules, séparées par des pores dont la dimension et la forme varient avec l'architecture interne. Un tel milieu se caractérise en partie par la porosité. Il possède une grande surface de contact entre les différentes phases qui peuvent coexister : phase solide, liquide, gazeuse. Les phénomènes de surface et les interactions entre les différentes phases se manifestant avec une grande intensité.

2°) *Les différents états de l'oxygène*

Parmi les gaz susceptibles d'occuper l'espace lacunaire, nous nous intéresserons au gaz carbonique et surtout à l'oxygène. L'oxygène à l'intérieur d'un tel milieu peut se présenter à plusieurs états :

Il peut exister à l'état libre dans les espaces lacunaires. Si les échanges sont libres avec l'atmosphère extérieure, il se trouve à la même pression partielle que dans cette atmosphère, son renouvellement est assuré par un phénomène physique : la diffusion.

A l'état lié, il est soit adsorbé à la surface du substrat soit dissous dans la phase liquide.

L'oxygène est susceptible de s'adsorber sur un substrat finement divisé. La fixation de l'oxygène s'opère par l'intervention des forces de VAN DER WAALS, elle est semblable à celle de l'azote. Cette adsorption d'azote, dans les conditions bien définies est la base d'une méthode de mesure de la surface (B. E. T.) d'un substrat divisé.

L'oxygène est soluble dans l'eau. Les lois de HENRY et DALTON régissent la solubilité des mélanges de gaz, le volume dissous dans l'eau est fonction de la température, de la pression du gaz non dissous et de la concentration en sels du solvant.

Solubilité de l'air en fonction de la température

Température	Solubilité O_2 (ml)	Solubilité N_2 (ml)	Solubilité de l'air (ml)
0°	10,19	18,99	29,18
10°	7,87	14,97	22,84
20°	6,36	12,32	18,63

La solubilité est d'environ 35 ml d'oxygène par litre d'eau pure à 15°C, sous la pression d'une atmosphère elle décroît avec la température de 1,6 p. 100 par degré, elle décroît également avec la concentration en sels, les Anglo-Saxons désignent cet effet sous le nom de « salting-out effect ». Cet effet s'explique par une hydratation des ions en solution, les molécules d'eau participant à l'hydratation acquérant des propriétés particulières les rendant moins aptes à dissoudre les gaz.

Les colloïdes influencent peut-être également la solubilité de l'oxygène dans l'eau du sol. Un effet analogue était observé pour H_2, CO_2 et NO_2 (FINDLAY, CREUGHTON, 1910 ; FINDLAY, SHEN, 1912).

3°) *La diffusion de l'oxygène en milieu poreux*

Généralement dans un milieu poreux, où un gaz est susceptible de se mouvoir, le diamètre des pores est toujours supérieur au libre parcours moyen des molécules de ce gaz. La diffusion gazeuse, qui tend à établir l'homogénéité d'un mélange de gaz

abandonné au repos, résulte de l'existence d'un gradient de concentration. La quantité de gaz qui participe à la diffusion est liée au gradient par une relation de la forme :

$$dQ = DSdC/dXdT \text{ (loi de Fick).}$$

— dQ est la masse de gaz diffusant durant le temps dT ;

— D est le coefficient de diffusion qui en milieu poreux diffère des conditions théoriques à cause de la configuration particulière des pores ;

— dC/dX le gradient de concentration en fonction de la distance ;

— S est la surface participant à la diffusion.

En régime permanent la concentration à une distance « X » est liée à la concentration dans l'atmosphère extérieure C_0, $C_x = C_0 + aX$ où « a » est une constante.

Cette relation est obtenue par intégration de la loi de diffusion.

Dans une étude plus approfondie des phénomènes pour traduire la configuration géométrique particulière du milieu poreux, hétérogène, l'équation de diffusion prend une forme plus complète. Pour tenir compte du fait que le parcours du courant gazeux n'est pas linéaire, on introduit un facteur correctif dit « facteur de tortuosité » et l'on définit alors un coefficient apparent de diffusion dans le milieu envisagé (D) relié au coefficient réel (D_0) par une relation empirique de la forme :

$$D/D_0 = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_n}{\varepsilon}\right)^2 \varepsilon^{4/3}$$

ε_n : porosité occupée par le liquide.

ε : porosité totale.

(Millington, Quirk, 1960) :

Le coefficient de diffusion de l'oxygène est à 25°C d'après Kolthoff, Miller, 1939 ; Stolzy et *al.* 1961.

Diffusion dans l'eau $D' = 2{,}6 \,.\, 10^{-5}$ cm² s⁻¹ ;

Diffusion dans l'air $D_0 = 2 \,.\, 10^{-1}$ cm² s⁻¹.

La vitesse de diffusion croît de 3 à 4 p. 100 par degré centigrade, elle augmente avec l'humidité.

Concernant le comportement des gaz en milieu poreux nous renverrons aux ouvrages de Carman (1961) et de Scheidegger (1960).

4°) *Mesures*

Pour caractériser la teneur en oxygène du milieu poreux considéré, on mesure la concentration de celui-ci dans la phase gazeuse ou la vitesse de diffusion à l'interface liquide-solide.

On pense, en effet, que la détermination des conditions à l'interface entre la surface de la racine et le sol lui-même permet d'établir la corrélation entre l'aération du sol et la croissance de la plante (Russel, 1950), ce qui justifie la détermination de cette vitesse dans le milieu poreux particulier que nous envisageons.

La mesure de la concentration nécessite le prélèvement d'un échantillon. Les premières déterminations concernant le sol furent faites par Boussingault et Lewy (1853), puis poursuivies par Schoesing fils (1889) et par Russel et Appleyard (1913-1914).

L'importance des échantillons varie avec les auteurs, certains opèrent même sur de micro-échantillons (0,1 ml par exemple) (HACK, 1956). On constate des variations très importantes dans la teneur en oxygène de tels échantillons. La grande variabilité des résultats soulève certaines critiques aussi bien en raison de la représentativité du milieu que l'échantillon veut caractériser qu'en raison des perturbations que les procédés d'échantillonnage peuvent introduire.

La détermination de la vitesse de diffusion de l'oxygène peut être réalisée grâce à une technique voltamétrique à potentiel constant (LEMON, ERICKSON 1952, 1955 ; LEMON, KRISTENSEN 1960).

La méthode est une extension au milieu poreux d'une technique utilisable en milieu liquide : la voltamétrie avec électrode solide ; on utilise une micro-électrode de platine. La méthode s'appuie sur le fait que l'oxygène présente deux vagues de réduction, qui correspondent aux schémas de réduction suivants :

Première vague

$O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O_2$ en milieu acide.

$O_2 + 2H_2O + 2e \rightarrow H_2O_2 + 2OH^-$ en milieu neutre ou alcalin

Deuxième vague

$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O_2$ en milieu acide

$H_2O_2 + 2e \rightarrow 2OH^-$ en milieu alcalin

Moyennant certaines précautions, on peut utiliser la technique voltamétrique en milieu poreux. On mesure alors le flux d'oxygène arrivant à la cathode.

Cette méthode tient compte du facteur de résistance du milieu à la pénétration du gaz, elle intègre de nombreuses variables conditionnant la diffusion puisque le courant enregistré dépend directement de cette diffusion.

On peut également faire appel à une autre technique dite « méthode de l'équilibre-diffusion », qui consiste à mettre en équilibre l'atmosphère d'une chambre à pression connue avec l'atmosphère du milieu à un endroit déterminé, ceci grâce à la diffusion, c'est la méthode mise au point par TAYLOR, ABRAHAMS 1953 ; ROBINSON 1957.

Toute méthode qui nécessite le prélèvement d'un échantillon soulève de nombreuses contestations, tant en raison de l'équilibre détruit, qu'en ce qui concerne la représentativité de l'endroit examiné et l'importance à donner à la prise, toute incidence sur l'analyse mise de côté.

Par contre, la méthode des microélectrodes, dans la mesure où l'on est certain du phénomène étudié, présente l'avantage de permettre de suivre une variation grâce à un enregistrement possible.

B — L'OXYGÈNE DANS LE SOL

Le sol est un milieu poreux, hétérogène, le comportement de l'oxygène doit être envisagé avec cette préoccupation constante.

1°) *Caractéristiques de l'atmosphère du sol*

On a rappelé précédemment les principaux auteurs qui contribuèrent à déterminer la composition de l'atmosphère du sol : RUSSEL et APPLEYARD (1915).

La composition de la phase gazeuse est différente de l'atmosphère extérieure, son hétérogénéité est aussi plus importante. On peut établir la composition moyenne suivante :

	CO_2	O_2	N_2
Atmosphère libre	0,03 %	20,9 %	78,0 %
Atmosphère du sol	0,9 %	19,6 %	79,5 %

Les chiffres obtenus par d'autres auteurs diffèrent très peu de ceux-ci.

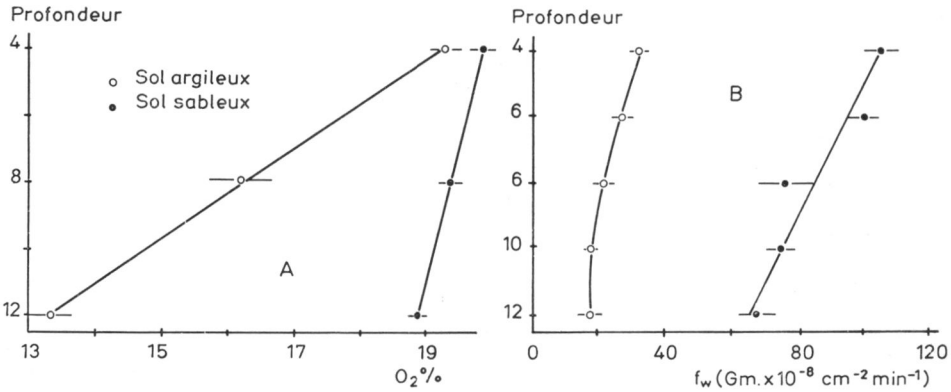


FIG. 1. — *Variation de la teneur en oxygène en fonction de la profondeur (en pouces) et de la nature du sol* (WIEGAND, LEMON, 1958)

L'oxygène est consommé dans le sol par les racines, et les micro-organismes ; au contraire, le gaz carbonique est produit, résultant de l'activité microbienne et de l'humification. Ces deux faits expliquent les différences de composition constatées. L'oxygène diffuse continuellement vers l'atmosphère du sol dont la teneur est plus faible, le gaz carbonique diffuse en sens contraire.

On constate des variations de la composition dans l'espace et le temps.

La teneur en oxygène oscille entre 13 et 21 p. 100 en volume. On enregistre une baisse en fonction de la profondeur et de la nature du sol. Suivant les exemples empruntés à WIEGAND et LEMON (1958) relatifs à un sol argileux et un sol sableux (fig. 1), on constate une diminution de teneur dans les deux cas. L'intégration de l'équation de diffusion explique cette décroissance linéaire ($C_x = C_0 + AX$). La pénétration de l'oxygène de l'air extérieur est plus lente en profondeur que pour les couches superficielles. La nature du milieu conditionne la porosité.

On observe des variations en fonction du temps. Ces variations se traduisent sur les figures 2 et 16 d'après RUSSEL et APPLEYARD (loc. cit.). Elles intègrent l'effet de facteurs météorologiques complexes : humidité, pluviosité, température.

Enfin, il existe d'autres causes de variations provoquant de minimes fluctuations

dans la composition de l'atmosphère du sol, nous citerons : un changement de pression barométrique, brusque et important, un vent important et provoquant un brassage intense de l'atmosphère extérieure, des conditions culturales diverses.

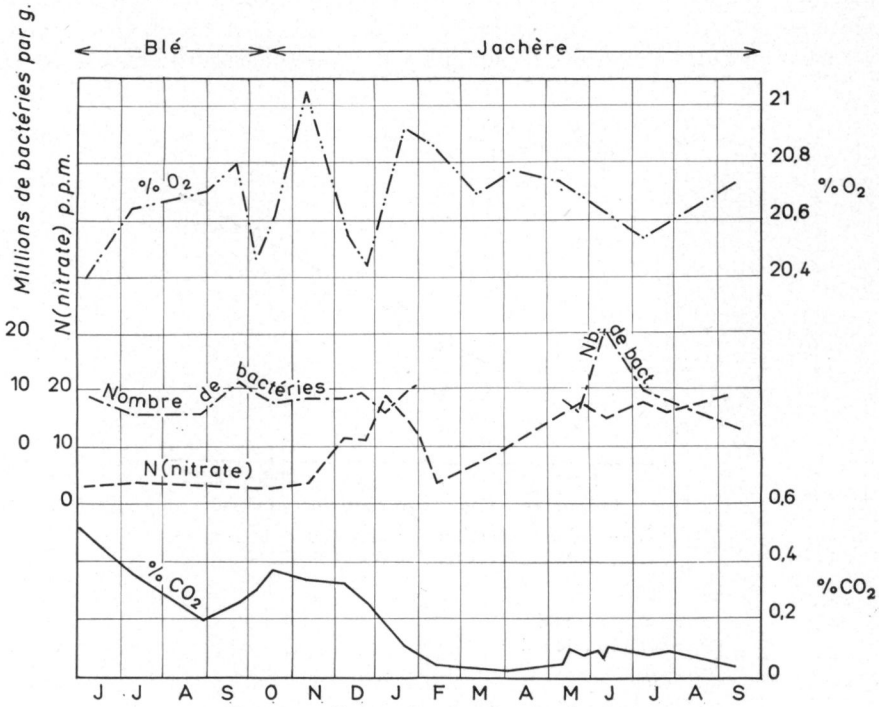


FIG. 2. — *L'atmosphère du sol en fonction du temps*
(RUSSELL, APPLEYARD, 1915)

2°) *L'oxygène dans les différentes phases*

L'oxygène en milieu poreux peut se rencontrer sous différents états, d'une part à l'état libre dans la phase gazeuse, d'autre part à l'état liée sous forme dissoute ou sous forme adsorbée.

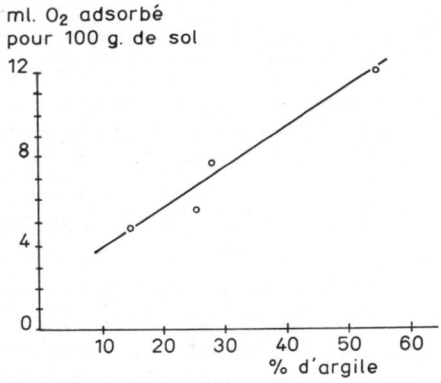


FIG. 3 *a*. — *Oxygène adsorbé en fonction de la teneur en argile*
Sol séché à l'air, 25° C, 730 *mm de mercure* (RUNKLES, SCOTT, NAKAYAMA, 1958)

L'oxygène peut s'adsorber sur les particules du sol. Les figures 3 *a*, *b* et *c*, tirées de travaux de RUNKLES, SCOTT et NAKAYAMA (1958) montrent cette adsorption. La courbe « a » montre un accroissement de la quantité adsorbée en fonction du taux d'argile, un sol séché à 110°C adsorbe d'autant plus d'oxygène que son taux d'argile est élevé, ce qui indique un phénomène de surface. La courbe « b » traduit l'influence de la teneur en eau. La courbe « c » indique deux phénomènes distincts : à une faible

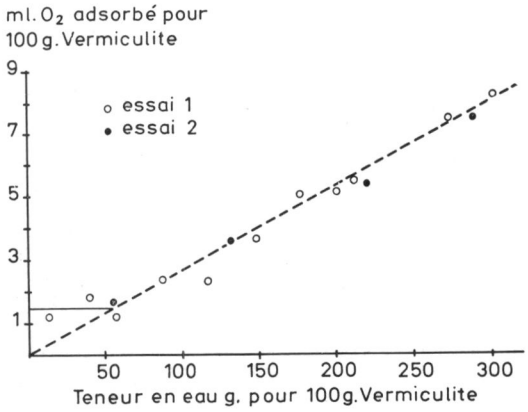


FIG. 3 *b*. — *Relation entre l'oxygène adsorbé et la teneur en eau* (RUNKLES, SCOTT, NAKAYAMA, 1958)

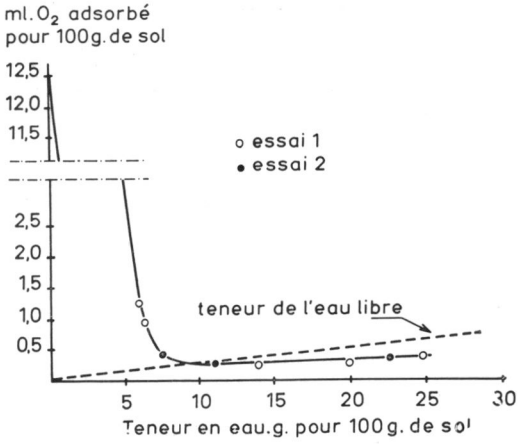


FIG. 3*c*. — *Adsorption d'oxygène en fonction de l'humidité* (RUNKLES, SCOTT, NAKAYAMA, 1958)

teneur en eau correspond une forte quantité adsorbée, à une teneur en eau élevée une diminution de la quantité d'oxygène qui devient même inférieure à la quantité théoriquement dissoute dans une eau libre. On peut penser que l'augmentation de la teneur en eau provoque une réduction des surfaces adsorbantes, et que la différence de solubilité dans l'eau libre et l'eau liée est due aux caractères particuliers de ce solvant. La courbe « b » montre également qu'aux taux d'humidité courants, la quantité d'oxygène adsorbée sera peu importante.

Ce précédent travail prouve la relation qui existe entre l'eau et l'air du sol, comme d'ailleurs le laissait prévoir la relation empirique liant le coefficient apparent de diffusion à la porosité et à la fraction de celle-ci occupée par l'eau :

$$D/D_0 = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_n}{\varepsilon}\right)^2 \varepsilon^{4/3}$$

Les travaux de MAKOWER et ses collaborateurs indiquent que l'adsorption de l'oxygène et de l'azote est faible en comparaison de celle du gaz carbonique.

Rappelons la conception actuelle sur l'état de l'eau dans le sol. On pense que celle-ci se répartit sous forme d'un film très mince (LOW, 1962) entourant toutes les particules, pénétrant à l'intérieur des feuillets d'argiles et formant un manchon autour des poils absorbants. L'épaisseur de la couche d'eau varie avec l'humidité du sol. Plusieurs couches de molécules d'eau, chacune d'entre elle couvrant une surface de 10 $Å^2$ et ayant une épaisseur de 3 Å environ, constituent ce film. La première de ces couches, au contact de la particule, a une structure particulière, qualifiée de quasi cristalline, elle est immobile. Les couches successives suivantes sont mobiles les unes par rapport aux autres, elles ont des densités et des viscosités différentes de l'eau libre et différentes entre elles. De nombreuses expériences tendent à prouver que ce film n'a pas une épaisseur constante et que même à des taux d'humidité très bas, il n'aurait pas une disposition monomoléculaire (MARSHALL, 1958).

Ces propriétés particulières de l'eau, dues aux interactions solide-liquide font penser que la solubilité de l'oxygène est affectée ; la mobilité de l'atome d'oxygène ou de l'ion oxygène pourrait être modifiée. L'influence des colloïdes sur la solubilité mentionnée antérieurement n'est peut-être que la traduction de ce phénomène.

Ce film d'eau apparaît comme un obstacle au cheminement du gaz vers la racine.

La phase gazeuse libre serait la source de l'oxygène dissous, il existerait un véritable équilibre de dissolution gouverné par les caractères propres du milieu.

3°) *Schéma d'oxygénation proposé*

En tenant compte de la distribution de l'oxygène dans le sol, de la conception actuelle de la répartition de l'eau et de certaines conclusions des travaux de WIEGAND et LEMON, on peut proposer un schéma d'oxygénation.

La racine ne comporte pas de lenticelles ni de stomates ; l'oxygène ne peut donc pénétrer à l'intérieur de la cellule que sous une forme dissoute ou d'ions hydratés. Cette adsorption se situe au niveau des poils absorbants et s'effectue par osmose. On s'accorde actuellement pour attribuer une charge à la surface de la racine comme pour les feuillets d'argile. Les propriétés de l'eau liée seraient alors les mêmes.

Le processus d'oxygénation peut se décomposer schématiquement en trois étapes : une « macro-diffusion », une solubilisation, puis une « microdiffusion ».

La respiration radiculaire se ferait donc par l'intermédiaire du film d'eau, qui n'apparaît plus alors comme une barrière mais comme un intermédiaire indispensable.

Une première diffusion ou macrodiffusion assurerait une distribution de l'oxygène dans les pores du sol, la phase gazeuse libre étant plus ou moins rapidement renouvelée et homogénéisée suivant la facilité avec laquelle peuvent se produire les phénomènes d'échange entre les deux atmosphères.

L'oxygène gazeux libre peut alors soit s'adsorber sur les particules, soit être dissous dans l'eau du sol suivant un mécanisme tenant compte des conditions particulières du solvant.

Dans le film d'eau, l'oxygène diffuserait à la surface de la racine par suite d'un gradient de concentration créé par la consommation de celui-ci par la racine. Cette diffusion ou microdiffusion serait influencée par les propriétés particulières de l'eau liée, la viscosité des couches d'eau et peut-être par les interactions de surface de nature électrique suivant l'état atomique ou ionique du gaz.

La mobilité d'une partie des couches d'eau appartenant au film permet aussi un mouvement de l'oxygène contenu, indépendamment de toute diffusion possible.

On peut traduire la macrodiffusion par une loi d'expression simple comme celle citée précédemment (A, 3).

Il n'est pas certain que la dissolution de l'oxygène s'opère suivant la loi de DALTON relative aux mélanges, les conditions étant assez différentes de celles auxquelles la loi s'applique habituellement. Des correctifs sont sans doute à employer pour celle-ci.

La diffusion dans le film d'eau doit, de plus, tenir compte de facteurs plus complexes, tels que la microporosité, les interactions de surface, l'accroissement de viscosité de l'eau, variable d'une couche monomoléculaire à l'autre (KEMPER 1960), la disposition géométrique des micropores.

Il faut alors considérer un coefficient de diffusion apparent différent du coefficient en solution (PORTER et *al.* 1960).

$$\frac{dQ}{dt} = D\gamma(L/Le)^2\theta A\frac{dc}{dx}$$

D — Coefficient de diffusion ;
γ — Facteur qui traduit les interactions ioniques et la viscocité de l'eau ;
$L/Le)^2$ — Facteur de tortuosité ;
θ — Teneur en eau ;
A — Section à travers laquelle le flux s'écoule ;
$\frac{dc}{dx}$ — Gradient de concentration.

Ces considérations permettent d'imaginer que la teneur en oxygène dissous puisse différer d'un point à l'autre, le film d'eau n'étant pas un milieu homogène, la répartition anionique et cationique variant avec la distance à l'interface liquide-solide (KEMPER, 1960).

L'alimentation de la racine résulte de ces différents mécanismes de diffusion dissociés pour les besoins de l'exposé. Elle ne sera assurée d'une manière correcte que si la vitesse de diffusion du plus lent d'entre eux, souvent la microdiffusion, est suffisante pour fournir un flux d'oxygène satisfaisant.

Rappelons qu'une particule d'un diamètre moyen de 10^{-8} cm se déplace par diffusion d'une distance moyenne de 6 μ par seconde. Le renouvellement de l'oxygène à la surface de la racine est sous la dépendance de l'épaisseur et de la viscosité des couches liées. En particulier, l'oxygénation pourra connaître une baisse sensible par suite de la présence d'une trop grande ou une trop faible quantité d'eau.

Une grande quantité d'eau dans un sol se ressuyant mal ou proche de la capacité de rétention ralentit les échanges entre l'atmosphère extérieure et la phase gazeuse libre du sol ; elle agira essentiellement sur la macrodiffusion. La quantité dissoute connaîtra donc un déficit. Dans nos régions un tel phénomène est susceptible de se produire sur un blé d'hiver à l'époque où le sol est voisin de sa capacité de rétention.

Si la quantité d'eau diminue jusqu'au point de flétrissement l'épaisseur du film est alors extrêmement réduite, ce qui affecte la solubilité et la mobilité de l'oxygène, l'oxygénation de la plante peut être réduite, c'est alors la vitesse de microdiffusion qui est réduite.

Ceci conduit à penser qu'il existe un rapport optimum entre l'importance de l'eau et de l'air (LEMON) (figure 4).

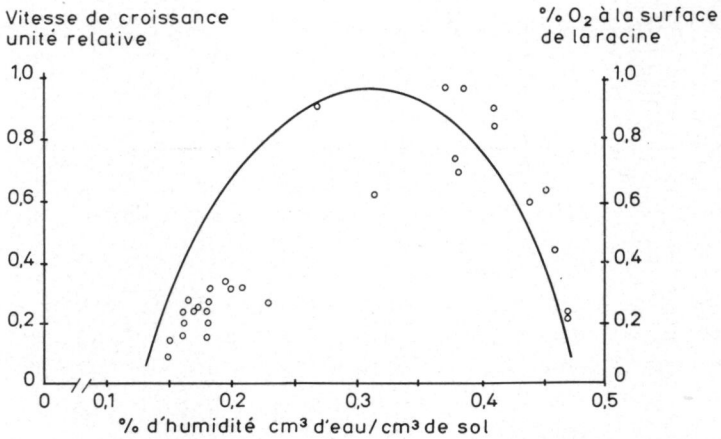


FIG. 4. — *Relation entre la vitesse de croissance, l'humidité du sol, la teneur en oxygène à la surface de la racine* (MILLER, MAZURAK, 1958; LEMON, KRISTENSEN, 1960)

4°) *Caractéristiques du sol en rapport avec l'aération*

Certaines propriétés du sol vont conditionner la diffusion : la texture et la structure conditionnant la porosité, la quantité d'eau présente dans le sol détermine la fraction de la porosité laissée libre aux échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère extérieure et la quantité d'oxygène pouvant être dissous.

Les courbes relatives aux sols sableux et les sols argileux (figure I) montrent, en accord avec la loi de diffusion, l'influence de la texture : un sol sableux est mieux oxygéné. Une faible porosité d'un sol apparaît comme un facteur de résistance à la pénétration, à l'échange gazeux.

En faisant quelques hypothèses simplificatrices relatives à la structure, au mécanisme respiratoire et s'appuyant sur la théorie de la diffusion gazeuse J. A. CURRIE (1961) détermine un rayon critique de l'agrégat. Il arrive ainsi à un rayon optimum pour une aération optimale du sol (figure 5). Il semble possible ainsi d'estimer la taille des agrégats qu'il faudrait donner à un sol de manière à éviter des conditions anaérobies pour une teneur en eau donnée.

Le coefficient de diffusion varie linéairement avec la porosité ; PENMAN (1940) trouve la relation linéaire suivante : $D/D_0 = 0{,}66\ S$ (S : porosité).

VAN BAVEL (1952) conclut à une valeur de $D/D_0 = 0{,}60$ S. Par contre, DE VRIES (1950) indique une relation de la forme $D/D_0 = 0{,}04 + 0{,}60$ S.

RUST (1957) et ses collaborateurs obtiennent des résultats analogues en étudiant la diffusion du gaz carbonique en milieu poreux.

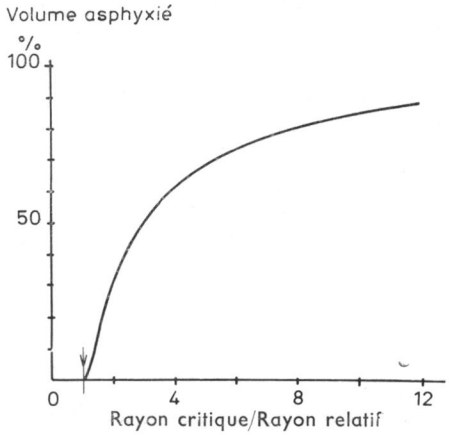


FIG. 5. — *Pourcentage d'atmosphère asphyxiée en relation avec la taille de l'agrégat* (CURRIE, 1958)

Si la quantité d'eau présente dans le sol augmente, la fraction de la porosité laissée libre aux échanges gazeux diminue, mais la quantité d'oxygène dissous augmente par unité de volume de sol. Les expériences culturales faites par KEMPER et

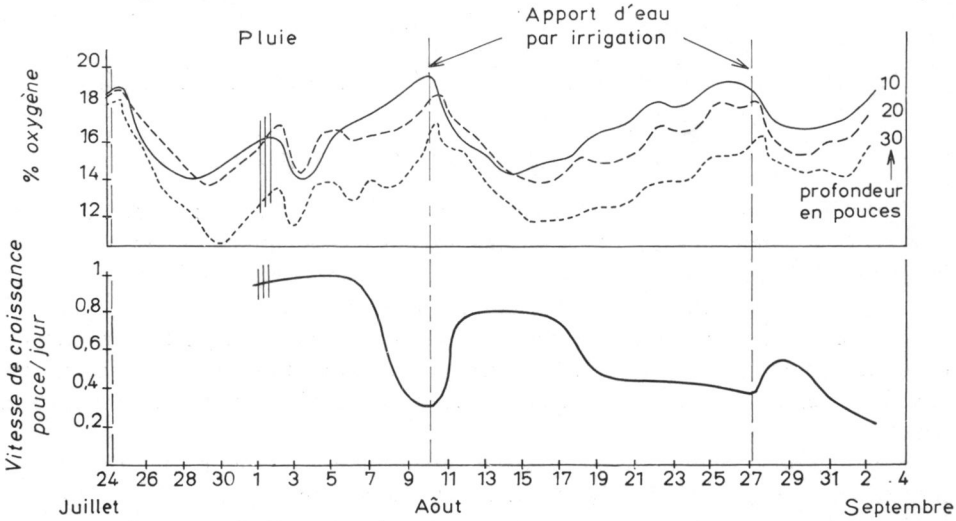


FIG. 6. — *Croissance de la Luzerne en fonction de la teneur de l'atmosphère, influence de l'eau* (KEMPER, AMEMIYIA, 1957)

AMEMIYA (1957) dont les résultats sont rapportées dans le graphique 6, montrent cet effet. On constate de même, après une chute de pluie, une reprise de l'activité microbienne du sol, reprise que l'on attribue à la quantité d'oxygène apportée par l'eau soit

de 9 à 11 p.p.m (l'eau de pluie est saturée en oxygène par suite de la division consécutive à la chute). Il faut noter aussi que dans les mêmes conditions, le gaz carbonique est susceptible de s'accumuler car sa vitesse de diffusion est réduite, une partie des pores étant obstruée. Par contre, dans le cas de l'irrigation, ces auteurs estiment que le sol ne bénéficie que d'un très faible apport d'oxygène, le sol subissant en outre une réduction de la surface diffusante.

L'humidité du sol se manifeste en relation avec la nature même du sol. Ainsi, en sol léger, un taux d'humidité, même élevé, a peu d'effet sur la teneur en oxygène ; par contre, en sol plus lourd, plus compact, la réduction de la tension d'oxygène se manifeste avec une plus grande intensité et persiste durant une plus longue période. L'importance de la porosité qui conditionne la vitesse de diffusion, donc le renouvel-

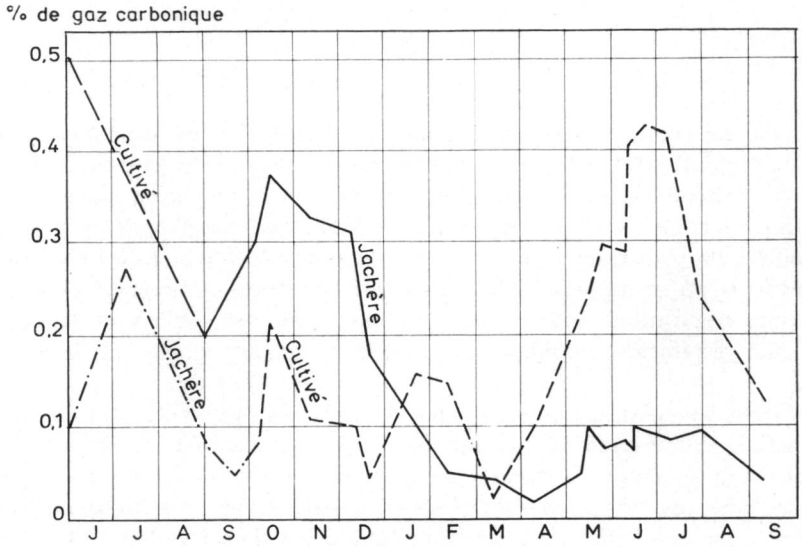


FIG. 7. — *Influence de la culture sur l'atmosphère du sol*
(RUSSEL, APPLEYARD, 1915)

lement de l'atmosphère doit être la raison principale de la différence constatée (BERTRAND et KUHNKE, 1957). Considérée sous cet angle, la phase liquide du sol prend une importance accrue, elle détermine la quantité d'oxygène mise à la disposition de la racine. Mais, vu les propriétés particulières de l'eau en minces couches et des différentes couches elles-mêmes, la quantité d'oxygène disponible ne varie pas avec la teneur globale en eau. On pourrait envisager de la rapporter au pF du sol qui traduit l'énergie libre molaire de l'eau, donc son état dans le sol, en considérant cependant que la détermination de l'épaisseur du film d'eau à partir d'une courbe pF-humidité doit tenir compte de la discontinuité possible de celui-ci (MARSHALL, 1958).

Il apparaît à la suite des travaux de WIEGAND et LEMON (1958) relatifs aux rapports entre l'eau et l'atmosphère, que :

1°) La concentration en oxygène à la surface de la racine est une fonction du logarithme du taux d'humidité.

2°) La vitesse de diffusion dans la phase liquide environnant la racine est plus souvent facteur limitant que la concentration dans la phase gazeuse. Ces auteurs ont pu établir par exemple que pour un certain sol où la concentration de la phase gazeuse est de 19,8 p. 100, elle n'est que 5,6 p. 100 à la surface de la racine, soit une réduction de plus de 70 p. 100.

La culture ou l'absence de culture sur un sol semble déterminer une différence de teneur de l'atmosphère environnante (RUSSELL et APPLEYARD, 1915 — graphique 7). Mais il est malaisé de délimiter pour quelle part exacte ce seul fait détermine les différences constatées. Les interactions sont nombreuses et beaucoup de facteurs se trouvent modifiés.

C — L'OXYGÈNE DANS LA PLANTE

1°) *Rôle de l'oxygène dans le métabolisme de la plante*

L'oxygène, comme le carbone, l'hydrogène, l'azote, est un élément essentiel dans le métabolisme. Il intervient dans les phénomènes respiratoires et dans les synthèses.

La détermination du rôle de l'oxygène a donné l'occasion d'une littérature assez riche, on trouve dans l'ouvrage de CLEMENTS (1921) une abondante bibliographie sur ce sujet. On peut résumer la question à la suite des travaux de LUNDEGARTH et BURSTROM (1935) en rappelant que l'activité respiratoire se ramène à deux parties :

a) une respiration basale assurant le maintien des racines et la croissance,

b) une respiration anionique qui fournit l'énergie requise à l'absorption des anions.

En effet, les synthèses effectuées par les organismes vivants sont des processus de réduction, leur caractère commun est qu'ils correspondent à un accroissement d'énergie libre, évolution contraire aux principes de thermodynamique, il est donc nécessaire que ces processus soient liés à d'autres transformations où l'oxygène intervient pour que l'effet total soit une diminution d'énergie libre. Ces réductions seront couplées avec des réactions suffisamment exergoniques pour abaisser le potentiel d'oxydoréduction. Dans ces synthèses, l'oxygène joue également le rôle d'accepteur d'hydrogène comme dans la respiration. L'importance de la présence d'oxygène est montrée par la culture en milieu liquide où il se révèle nécessaire d'aérer. Il faut cependant se garder de généraliser les résultats obtenus puisque ce milieu est fondamentalement différent du milieu poreux.

Cependant, les travaux de WOODFORD et GREGORY (1948) ont montré qu'en milieu liquide non aéré, la culture est rendue possible durant un temps considérable à condition que la concentration saline soit quatre fois celle de plantes aérées. Il y aurait lieu de savoir si ces sels interviennent directement dans le métabolisme par exemple en fournissant des groupements oxygénés ou agissent en élevant la pression osmotique.

D'autre part, ARNON, GILBERT et SHIVE (1937, 1942) ont démontré que l'ion nitrate était plus rapidement absorbé dans des conditions faiblement aérées, comparativement à l'ion ammonium. Il semble que la plante puise un supplément d'oxygène dans la réduction des nitrates dans ce cas. De même PEPKOWITZ et SHIVE pensent que, puisqu'il existe des groupes réducteurs dans la plante, la réduction des sulfates

est susceptible d'apporter un supplément d'oxygène actif. La réduction des nitrates et des sulfates permettrait la respiration en conditions anaérobies, la réduction des phosphates serait impossible, ceux-ci entrant dans un complexe organique.

2°) *L'oxygène et la morphologie*

L'aspect morphologique de l'appareil racinaire varie avec l'intensité de l'oxygénation. Le système racinaire de plantes aérées est plus long et plus ramifié que celui de plantes se développant en anaérobiose, il est également plus blanc et plus épais que celui de plantes mal pourvues où il apparaît petit et fibreux.

La première réponse de la plante à la suppression de la diffusion est un accroissement du système racinaire ; la plante cherche, semble-t-il, à compenser le déficit du flux d'oxygène en augmentant son domaine d'exploitation.

3°) *Zone exploitée par la racine*

On peut déterminer le rayon d'exploitation d'une racine, comme le propose PETERS (1957) en considérant l'eau d'hydratation contenue dans celle-ci et en négligeant les interférences dues aux autres racines. Cette appréciation, dans sa rigueur mathématique, méconnaît de nombreux facteurs et ne constitue qu'une première approche du problème, ignorant l'aspect dynamique du phénomène d'oxygénation. Rapportons ici la formule qu'utilise cet auteur :

$$R_M - R_R^2 = \frac{\text{Grammes d'eau absorbée durant 24 Heures}}{(P_{W(T)} - P_W(15)dh\pi}$$

R_M = rayon exploré ;
R_R = rayon moyen de la racine ;
$P_{W\ (T)}$ = contenu d'eau à la tension du début ;
$P_{W\ (15)}$ = contenu d'eau à la tension de 15 atmosphères ;
d = densité de la racine, sensiblement 1 ;
h = longueur finale de la racine.

Il semble cependant qu'il faille accorder une grande importance au développement du chevelu racinaire et à la surface qui en résulte. Les racines les plus fines sont les plus actives, la paroi des parties plus âgées étant subérisée.

Certaines plantes se révèlent plus capables que d'autres de résister à l'asphyxie.

Le flux d'oxygène à la surface de la racine peut être mesuré par la technique de la microélectrode de platine qui simule la racine en place. On peut déterminer une concentration critique au-delà de laquelle la respiration est arrêtée (BERRY, 1943). L'aptitude d'un sol à assurer un flux d'oxygène à cette concentration est une caractéristique à envisager.

4°) *L'oxygène et l'activité métabolique*

Les périodes d'intense activité métabolique sont marquées par des besoins élevés en oxygène.

Ainsi par exemple, lors de la germination si la vitesse de diffusion est inférieure à $75\text{-}100 \cdot 10^{-8}$ g/cm²/mn la proportion de levée diminue rapidement (figure 8) d'après HANKS et THORP, 1956). Ce chiffre représente environ pour 24 heures une

quantité d'oxygène de 1 l/cm². Le graphique 9 tiré des travaux de KARSTEN montre l'influence de l'oxygène dissous sur la croissance.

La croissance même de la racine diffère suivant les niveaux d'oxygène (figure 10,

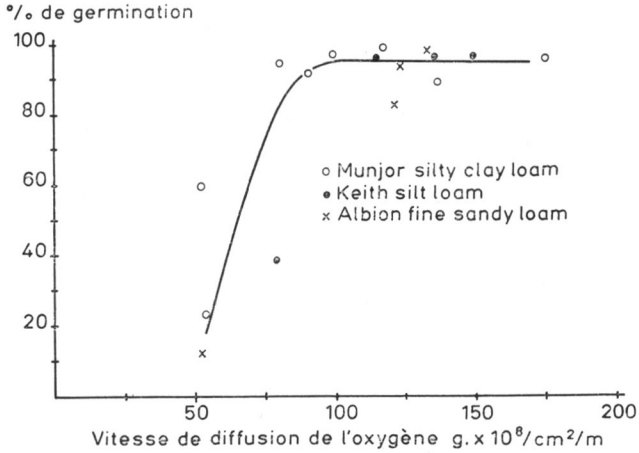


FIG. 8. — *Relation entre le pourcentage de germination et la vitesse de diffusion de l'oxygène* (HANKS, THORP, 1956)

d'après GILL et MILLER). Dans ce mémoire, la résistance mécanique est traduite comme une pression, on peut constater qu'à une faible résistance mécanique, la croissance n'est pas arrêtée à un faible taux d'oxygène, mais considérablement

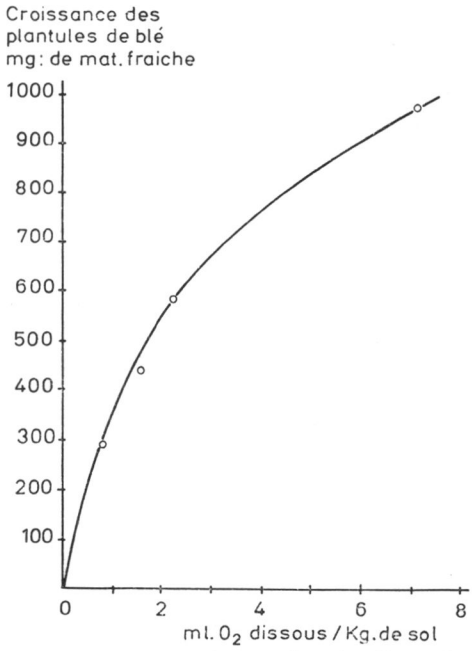


FIG. 9. — *Croissance du Blé en relation avec l'oxygène dissous dans l'eau du sol* (KARSTEN, 1939)

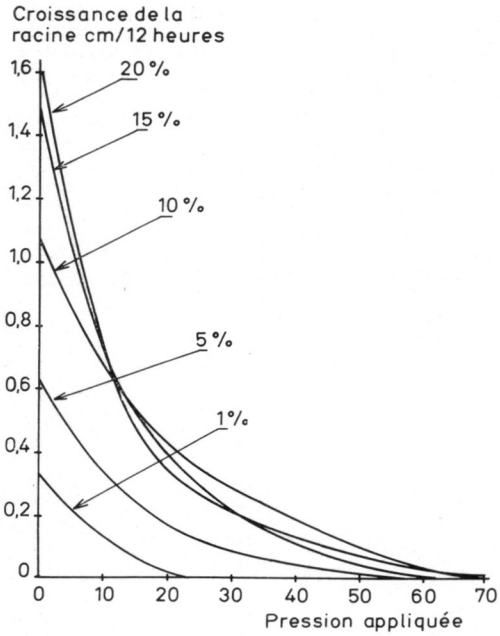


FIG. 10. — *Relation entre la croissance, la résistance mécanique du sol et l'aération. Les chiffres sur les courbes indiquent le pourcentage d'oxygène. Les pressions sont exprimées en livre par pouce carré* (GILL, MILLER, 1956)

TABLEAU I

Effet des différentes tensions d'oxygène sur la composition chimique de tiges et de racines de maïs (d'après SHAPIRO *et* al., 1956)

% O_2	19,4 ± 0,06 (%)	12,8 ± 0,5 (%)	5,2 ± 0,3 (%)	Différence significative (%)
		Tiges		
K	2,92	2,73	2,34	0,36++
Mg	1,24	1,12	0,73	0,15++
P	0,39	0,34	0,18	0,04++
N	2,60	2,58	2,25	0,16++
Ca	1,49	1,42	1,51	n. s.
Na	0,09	0,12	0,12	n. s.
		Racines		
K	0,13	0,13	0,21	0,06++
Mg	0,06	0,06	0,09	0,02++
P	0,16	0,16	0,21	0,02++
N	1,17	1,28	1,93	0 —
Ca	0,72	0,73	0,80	n. s.
Na	0,15	0,10	0,14	n. s.

++ : seuil de signification 1 % ;
\+ : seuil de signification 5 % ;
n. s. : non significatif.

TABLEAU 2

Effet de la réduction de la tension, par arrêt de la diffusion gazeuse durant une courte période

	Tiges			Racines		
	Normal	Réduit	Diff. sign.	Normal	Réduit	Diff. sign.
K	2,68	2,90	0,21+	0,468	0,376	0,088++
Mg	1,12	1,19	n. s.	0,181	0,183	n. s.
P.....	0,377	0,365	n. s.	0,169	0,162	n. s.
N	3,02	3,04	n. s.	1,46	1,47	n. s.
Ca	1,16	1,26	0,08++	0,85	0,78	n. s.
Na	0,084	0,109	n. s.	0,182	0,151	n. s.

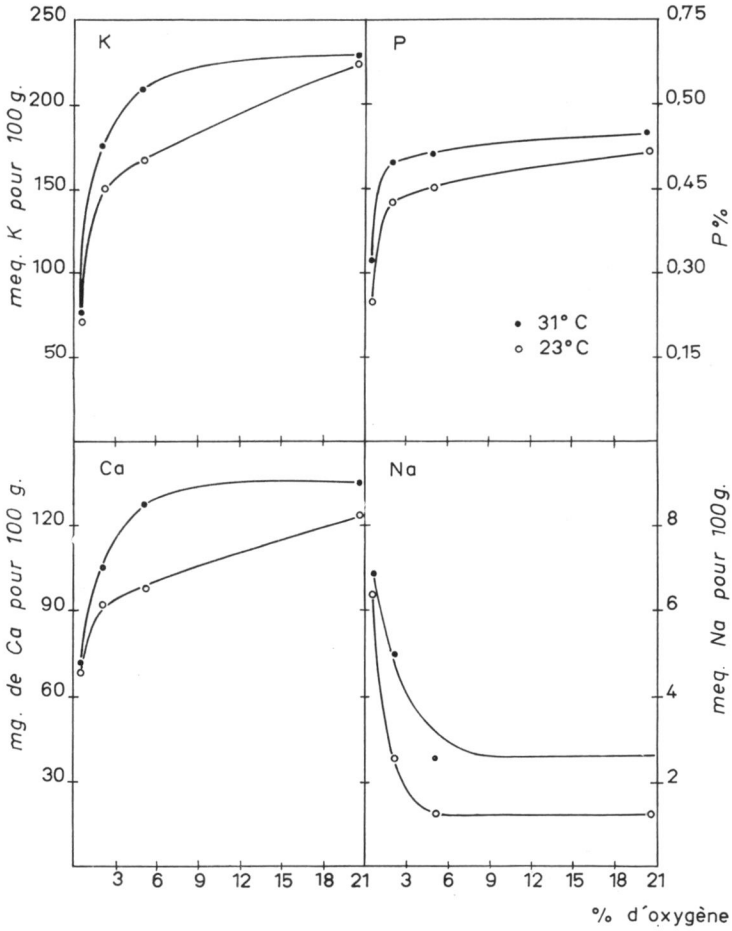


FIG. 11. — *Teneur minérale de jeunes pousses de Tournesol pour différentes concentrations en oxygène à deux températures* (LETEY, STOLZY, BLANK, 1961)

ralentie. Dans la pratique, le point critique peut être atteint si le sol se trouve tassé, s'il est trop humide ou si le semis est effectué à une trop grande profondeur.

Des expériences en pots montrent que la teneur en oxygène affecte le rendement

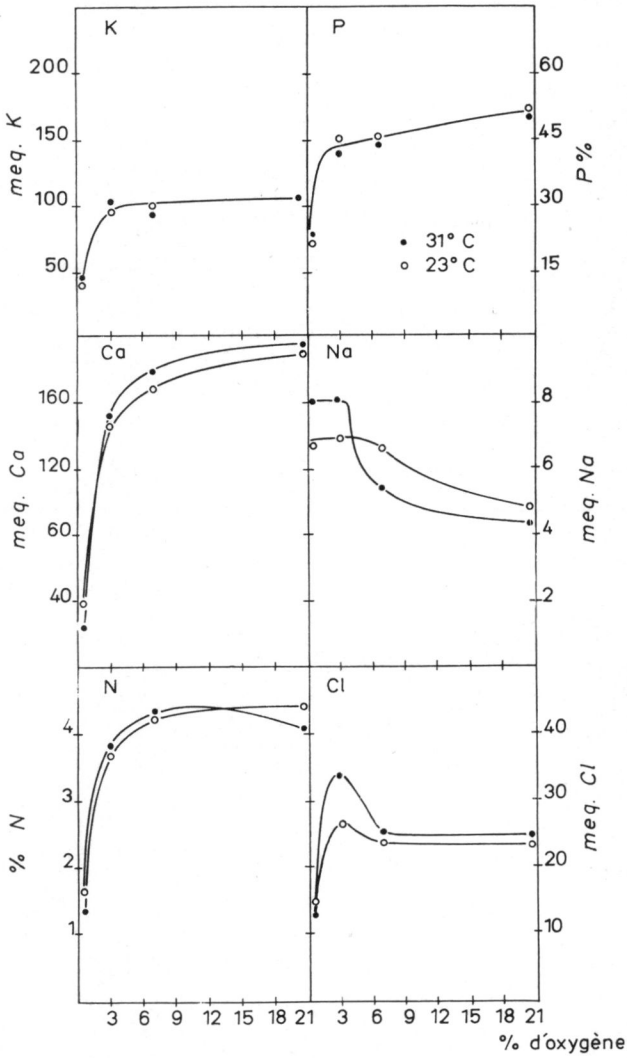


FIG. 12. — *Teneur minérale de jeunes pousses de Coton pour différentes concentrations en oxygène à deux températures* (LETEY, STOLZY, BLANK, 1961)

et modifie le prélèvement des ions (CLINE et ERICKSON, 1959). On observe une réduction du rendement en poids pour les tiges et les racines à un bas taux d'oxygène. Les pourcentages de K, Mg, P, N se trouvent réduits dans la tige mais accrus dans la racine, la perturbation affecte donc le déplacement des ions dans la plante de la racine à la tige, l'oxygène intervenant par son rôle dans les synthèses. On notera le

comportement particulier du sodium et du chlore par rapport aux autres éléments, (voir tableaux 1, 2, 3, fig. 11 et 12). On notera l'extrême difficulté que l'on rencontre pour réaliser de telles expériences, la teneur en oxygène devant seule varier. Les

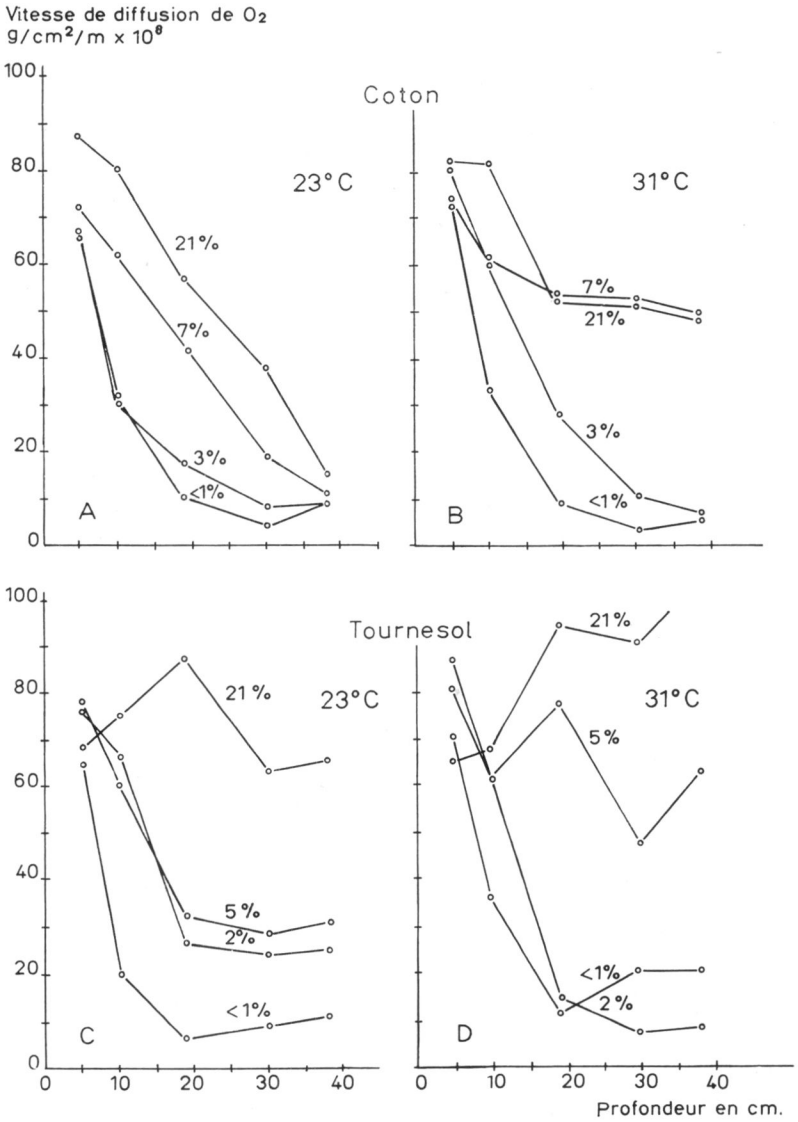


FIG. 13. — *Vitesse de diffusion en fonction de la profondeur pour différentes teneurs en oxygène à deux températures* (LETEY, *et al.*, 1961)

figures 13 et 14 montrent l'influence de la température sur l'oxygénation et la vitesse de diffusion, elles sont empruntées à LETEY et *al.* (1961). Les conclusions tirées de telles expériences doivent être très prudentes, ainsi par exemple il semble, d'après le tableau 3 que la betterave soit sensible à la réduction de la vitesse de diffusion.

Sur un sol à des niveaux de fertilité différents, la plante réagit d'une manière semblable en fonction de la vitesse de diffusion, la figure 15 tirée des travaux de CLINE et ERICKSON (1959), où la hauteur de la plante est prise comme critère de la réponse,

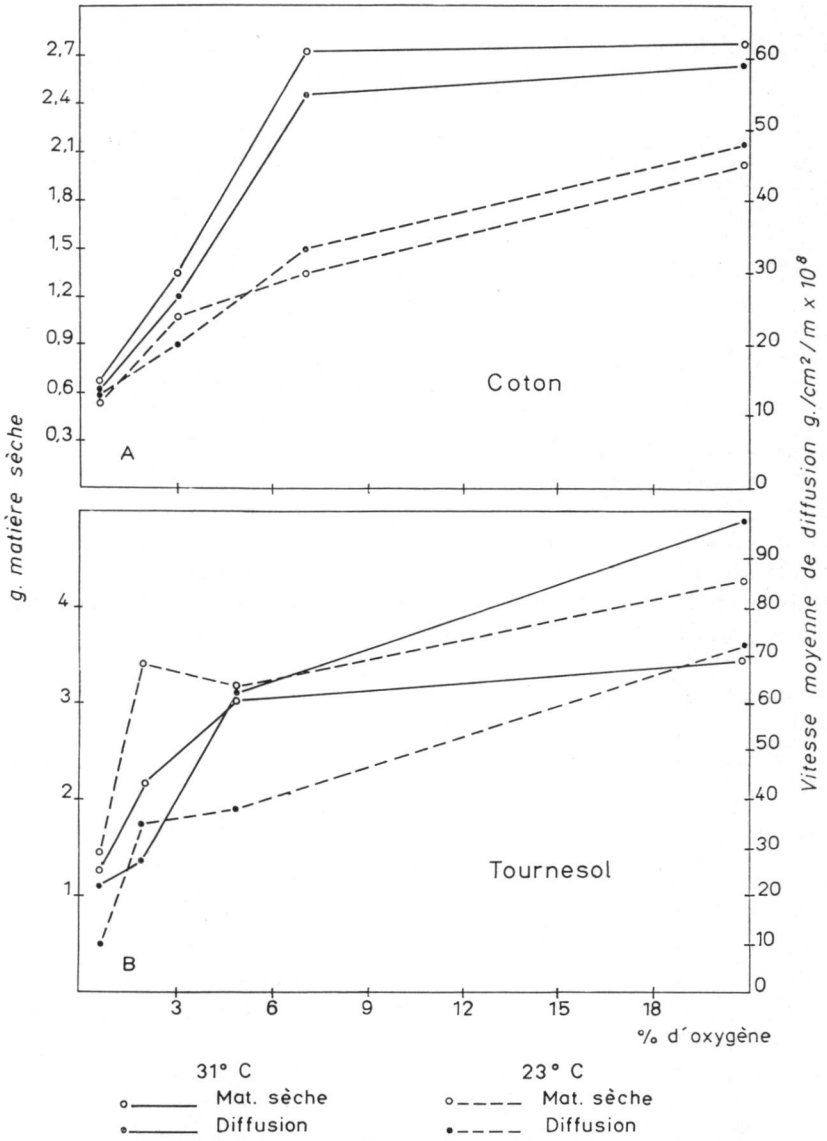


FIG. 14. — *Matière sèche et vitesse moyenne de diffusion pour différentes teneurs de l'atmosphère en oxygène* (LETEY *et al.*, 1961)

en témoigne. Les courbes font apparaître un niveau critique aux environs de 70 à $100 \cdot 10^{-8}$ g/cm²/mn. De plus chez de jeunes plantes un haut niveau de fertilité compense une déficience en oxygène. Par contre, à bas niveau de fertilité l'effet de l'engrais est plus fort que l'effet de l'oxygène.

On constate également chez les végétaux des périodes où la plante est plus sensible à un manque d'oxygène C'est ainsi que le pois est plus sensible durant les vingt-cinq derniers jours de croissance que durant les premiers. Le pois serait parti-

TABLEAU 3

Effet de la vitesse de diffusion sur le rendement du Maïs et de la Betterave à sucre (ERICKSON *et* VANDOREN, 1960)

Année	Betterave à sucre		Maïs	
	Vitesse dif.	Rdt T/A	Vitesse dif.	Rdt T/A
1955	40,7	21,25	43,25	80,5
1956	30,5	10,25	34,5	110
1957	30,5	9,5		
1958	40,3	21,9	43,5	63
1956	32,0	9,2	35	65
1957	30,5	7,75		

Les mesures sont faites 18 jours après la plantation en 1955, 27 jours après en 1956 et 21 jours en 1957. Il n'y a pas eu de chutes de pluies venant perturber les mesures.

culièrement sensible à la réduction de l'oxygène si la limitation de la diffusion survient au moment de la floraison, comme le montre le tableau 4.

Des expériences analogues réalisées sur tomates (ERICKSON et VANDOREN 1960) en considérant les interactions entre l'oxygène et la radiation solaire, ont montré que

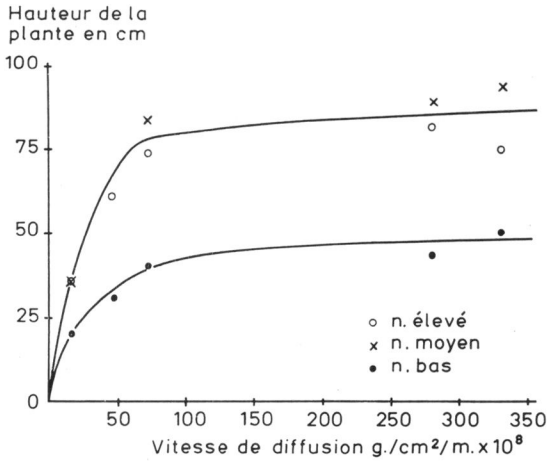


FIG. 15. — *Relation entre la hauteur de la plante (Pois) et la vitesse de diffusion pour trois niveaux de fertilité* (CLINE *et* ERICKSON, 1959)

la plante est plus particulièrement sensible au moment où se produit la faible insolation. Le rendement est affecté significativement pour une réduction limitée à une journée. Il semble donc que cette déficience d'oxygène, non compensée par un apport énergétique sous forme calorifique entraîne de profondes modifications dans le métabolisme.

Ainsi, aux champs, il y aurait lieu d'envisager la vitesse avec laquelle le taux de diffusion d'oxygène se rétablit après une averse uniforme et une période à faible ensoleillement, aspect nouveau des rapports entre la plante, le sol et l'eau.

TABLEAU 4

Effet de la limitation de la diffusion gazeuse sur le rendement du Pois.
La diffusion est suspendue pendant une seule journée à un intervalle de temps variable après la plantation

Jours après la plantation où la réduction survient	Rdt poids sec en g
12	19,6
14	21,0
27	20,0
36	22,3
43	21,1
54	14,3
69	19,5
71	19
jamais	25

En conclusion, nous retiendrons que BOYNTON (1938) et ses collaborateurs pensent qu'un taux de 3 p. 100 d'oxygène permet encore la poursuite de la vie cellulaire mais que, néanmoins dès 10 p. 100, l'absorption et l'accumulation des ions minéraux sont extrêmement lentes et peuvent être arrêtées. Nous signalerons enfin que d'autres auteurs, tels FREE, pensent qu'il existe une pression critique pour une croissance normale ou optimale. La détermination expérimentale d'une telle donnée est impossible, elle ne peut être qu'une appréciation résultant de l'étude des différents facteurs déterminant l'oxygénation.

D — L'OXYGÈNE ET L'ACTIVITÉ DES MICRO-ORGANISMES

Dans le sol, la vie et l'activité microbienne sont consommatrices d'oxygène. Nous envisagerons maintenant les rapports entre l'oxygène et les micro-organismes.

1°) *Rôle de l'oxygène*

Les micro-organismes du sol consomment essentiellement l'oxygène dans des réactions de respiration oxydative et d'oxydation du carbone organique avec dégagement du gaz carbonique. Il existe divers modes de respiration depuis celui des aérobies stricts nécessitant la présence d'oxygène libre, jusqu'à celui des anaérobies stricts d'exigences contraires en passant par des formes facultatives. Il existe de même pour tous les organismes du sol des possibilités semblables. Ainsi certains proto-

zoaires sont capables de réduire des substances hautement oxydées. On constate une répartition des micro-organismes influencée par l'aération, le développement des anaérobies étant prépondérant en profondeur et souvent accompagnés d'actinomycètes (POCHON et de BARJAC, 1958).

Reprenant le schéma d'oxygénation proposé pour les végétaux on peut penser que les micro-organismes consomment l'oxygène à l'état dissous. Par leurs dimensions (2 à 20 μ) ils sont comparables aux plus fins des poils absorbants. Le film d'eau, même s'il peut atteindre 300 Å, comme certains auteurs le pensent, ne représente alors encore qu'un centième de leurs dimensions.

2°) *La flore du cycle de l'azote*

La plupart des micro-organismes de ce cycle sont aérobies. Les azotobacters sont des aérobies stricts, qui cependant supportent des tensions d'oxygène réduites, avec parfois une fixation plus efficace, comme l'illustre les chiffres suivants :

9 p. 100 d'oxygène : fixation de 23 mg d'azote/gramme de saccharose fourni.

20 p. 100 d'oxygène : fixation de 8 mg d'azote/gramme de saccharose fourni.

On pense que des phénomènes très complexes interviennent, tel le rapport O_2/N_2. Ce rapport conditionnant la dissolution, ce fait corrobore notre hypothèse. Les rhizobium sont aérobies plus ou moins stricts, on constate cependant leur aptitude à croître en présence d'oxygène en faible quantité. La respiration de racines nodulées se trouve doublée ce qui montre la consommation des Rhizobium.

Les nitrificateurs sont des aérobies stricts, l'oxygène étant nécessaire aux réactions oxydatives de nitrification et nitratation (POCHON et de BARJAC, p. 152).

$$NH_4^+ + 11/2\ O_2 \rightarrow 2H^+ + H_2O + NO_2^- + 66\ \text{Kcal}$$
$$NO_2^- + 1/2\ O_2 \rightarrow NO_3^- + 17\ \text{Kcal}$$

Les nitrificateurs consomment environ 100 atomes d'oxygène pour un atome de carbone assimilé, par comparaison ils consomment environ vingt fois plus que la plupart des germes hétérotrophes.

Rappelons les résultats de SCHLOESING sur la nitrification :

Pourcentage d'oxygène.....	6	11	16	21
mg de NO_3H formé.....	199	222	203	225

L'expérience n'est guère significative puisque les résultats ne s'écartent pas de plus de 6,1 p. 100 de la moyenne. D'autres auteurs réalisant des études analogues pensent que la concentration optimum serait légèrement supérieure à la concentration atmosphérique et atteindrait la valeur de 40 p. 100 (PLUMMER 1916). Les nitrificateurs n'utilisant que le carbone minéral, demandent de grandes quantités de CO_2, CO_2 provenant du métabolisme d'aérobies, consommateurs d'oxygène. Ceci explique la répartition préférentielle des nitrates dans les horizons supérieurs et l'effet favorable du travail du sol.

Il existe une relation entre le gaz carbonique produit, la quantité de nitrates et le nombre de micro-organismes présents (RUSSELL et APPLEYARD, 1915). On retrouve en particulier les mêmes fluctuations saisonnières et l'on observe deux maximums, début avril et octobre et deux minimums en février et en août (fig. 16).

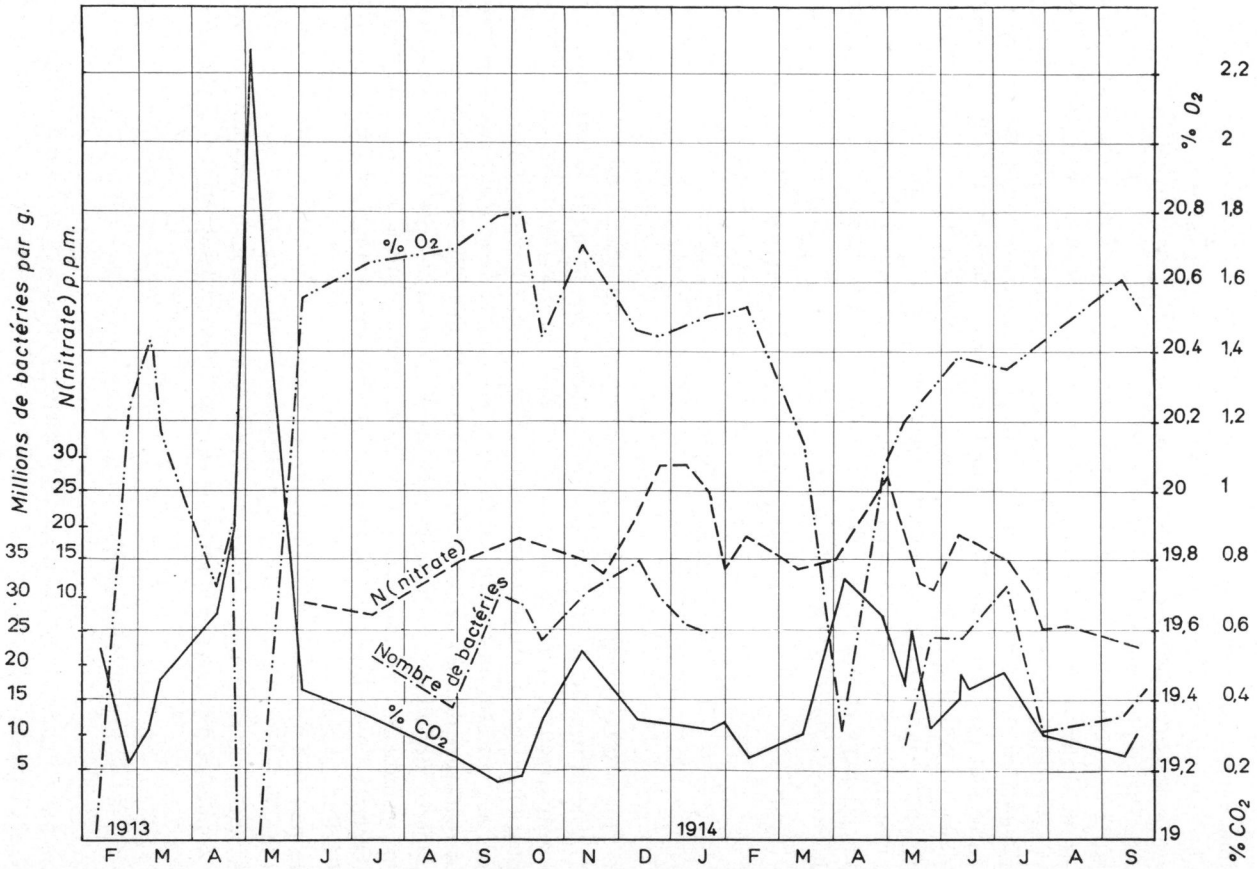


FIG. 16. — *Relations entre le pourcentage de gaz carbonique et l'oxygène dans l'atmosphère du sol, le nombre de bactéries, la teneur en nitrates* (RUSSELL, APPLEYARD, 1915)

3°) *Dénitrification et réorganisation*

Nous avons signalé précédemment la possibilité d'une réduction des nitrates en vue d'un apport supplémentaire d'oxygène. Certains germes banaux se montrent capables de cette réduction même en présence d'oxygène. Il semble que l'influence de l'oxygène sur ce phénomène soit encore assez mal établie.

Parmi les expériences réalisées on peut grouper celles faites avec des cultures pures en milieu liquide, puis celles réalisées sur le sol lui-même. Des premières il ne semble pas possible de tirer une conclusion générale. Quant aux dernières certains auteurs en déduisent l'effet inhibiteur de l'oxygène et pensent que la dénitrification est inversement proportionelle à la tension d'oxygène ; d'autres affirment la possibilité d'une réduction des nitrates en présence d'une tension d'oxygène importante, tel BROADBENT 47 p. 100 O_2 (CADY et BARTHOLOMEW, 1961). Il semble cependant que la dénitrification soit plus importante pour des conditions presque anaérobies (ALLISON, CARTER et STERLING 1960). En utilisant l'azote marqué, on a pu obtenir les données suivantes (TYLER et BROADBENT, 1960) :

Niveaux d'oxygène	Pertes en azote
1–1,6 %	52,1 mg
4–5,7 %	10,6 mg
7–8,5 %	1,9 mg

De plus on a pu montrer que les micro-organismes utilisent à la fois l'oxygène libre et l'oxygène provenant de la réduction des nitrates. Les produits de dénitrification sont l'azote gazeux et l'oxyde nitreux (N_2 et N_2O) en conditions aérobies. Certains pensent qu'il y aurait une réabsorption possible de l'oxyde nitreux par des cellules adaptées aux nitrates ou formées en présence d'oxygène. Les conditions nécessaires pour la réduction de N_2O en présence d'oxygène semble être une grande « pression biologique » et une absence de nitrates et composés nitrés à un degré d'oxydation élevé.

On constate des variations d'azote minéral présent dans le sol en un temps très court, ces variations s'observent souvent en même temps pour la surface et la profondeur (HEBERT, 1960).

On ne constate pas de relation entre les variations de température, les pluies, l'humidité du sol et les variations d'azote minéral. Seule la tension d'oxygène semble un mécanisme suffisamment rapide pour intervenir dans la compétition entre hétérotrophes et nitrifiants et expliquer ces variations constatées.

4° *Dégradation de la matière organique*

Les phénomènes de dégradation de la matière organique et l'humification font intervenir l'oxygène. Les produits terminaux d'oxydation sont presque constamment CO_2 et H_2O. Le gaz carbonique, pris généralement comme critère de l'activité biologique d'un sol représente en fait le bilan d'une part de phénomènes purement chimiques d'oxydation de la matière organique et d'autre part de la respiration microbienne.

L'humification évolue de manière différente suivant les conditions d'aération. Si la tension d'oxygène est faible l'humus évolue vers la formation d'un « mor », en aérobiose, l'humus donne un « mull ».

On a cherché à déterminer l'influence de l'apport de matières organiques sur la composition de l'atmosphère du sol (figure 17 — EPSTEIN et KOHNKE, 1957).

Lors de l'apport de matière organique à une profondeur de 5 cm, on observe une baisse beaucoup plus marquée de la teneur en oxygène dans les huit premiers centimètres que dans la zone comprise entre 8 et 20 cm. L'appauvrissement se manifeste environ durant une quinzaine de jours.

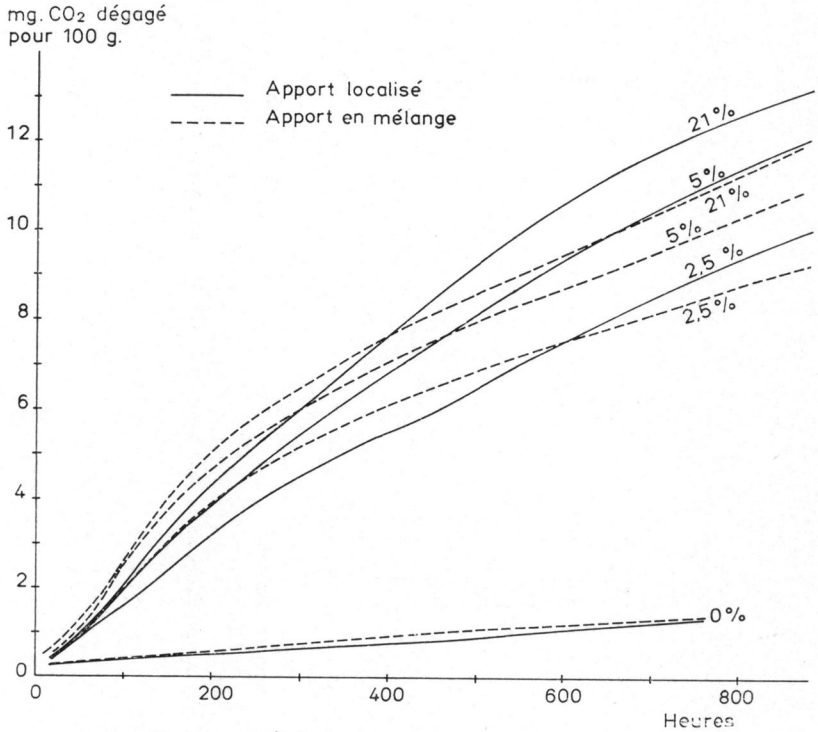


FIG. 17. — *Évolution de la matière organique apportée suivant la teneur en oxygène* (EPSTEIN, KOHNKE, 1957)

Si la matière organique est apportée en localisation, on constate une baisse de teneur qui se traduit ainsi : témoin < mélange en surface < couche à quelques centimètres < apport en surface.

La tension d'oxygène dans la phase gazeuse se traduit alors :

Traitements	Jours où % O_2 < 15
Témoin	0
Mélange en surface	2,5
Couche à 2 cm	5
Couche en surface	7,5

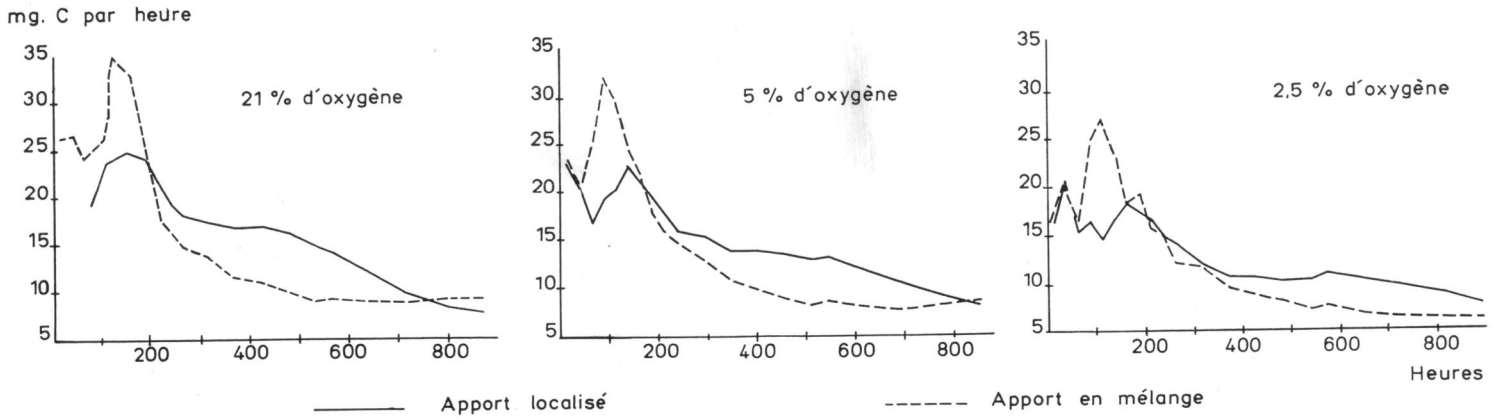


FIG. 18. — *Effet de trois niveaux d'oxygène sur l'évolution du carbone de la matière organique apportée en mélange et en localisation* (PARR, REUSZER, 1959

Le dernier traitement agit par un prélèvement de l'oxygène mais surtout empêche les échanges. Il démontre la nécessité d'incorporer la matière organique au sol lors d'un apport. On a également cherché l'influence de l'apport de matière organique en contrôlant les deux facteurs suivants : humidité et état de tassement du sol.

A pF 2,6, le sol tassé accuse une baisse de la teneur d'oxygène durant une plus grande période.

Poids spécifique	Jours où % $O_2 < 15$
0,82 g/cm³	8
1,05 g/cm³	8
1,34 g/cm³	19

A pF 3,6, la teneur minimum est plus basse pour un sol tassé, le relèvement du taux d'oxygène est moins rapide également. Ces différentes mesures sont faites à partir d'expériences en pots, d'un volume forcément limité, ce qui réduit l'intensité des échanges gazeux et ne permet pas l'extrapolation des résultats aux conditions du plein champ.

PARR et REUSZER (1958) ont étudié la vitesse de décomposition de la matière organique. Le dégagement de gaz carbonique est pris comme critère de l'évolution de celle-ci. Ils opèrent dans une enceinte fermée en contrôlant la composition de l'air à l'entrée et à la sortie (fig. 18). On peut voir qu'à tous les niveaux d'oxygène, l'allure générale est la même, que la matière soit mélangée ou localisée. La décomposition est très rapide au départ pour le traitement en mélange ce qui s'explique facilement. L'oxydation de la matière organique peut ainsi mobiliser une grande partie de l'oxygène disponible et affecter d'autant la respiration des racines dans le cas pratique.

CONCLUSION

Cette mise au point bibliographique situe l'importance de l'atmosphère du sol en montrant la nécessité de l'apport d'oxygène à la racine. La diffusion se révèle le phénomène physique conditionnant une bonne aération, il y a lieu d'envisager avec une grande attention les phénomènes qui ont lieu aux interfaces gaz-liquide et liquide-solide.

Le schéma d'oxygénation proposé s'inspire des idées actuelles sur la nature du contact particule-racine en accordant une grande place au rôle joué par l'eau (LOW, 1962). Aussi, il apparaît nécessaire de repenser des phénomènes tels que la dissolution du gaz dans un solvant lié comme il existe dans le sol et aussi de rechercher les moyens propres à assurer une vitesse de macro-diffusion rapide, ceci en liaison avec la porosité et la structure du sol (CURRIE, 1961). La micro électrode, méthode simple et rapide, doit être le critère susceptible d'aborder ces différentes recherches.

Reçu pour publication en mai 1963

SUMMARY

A BIBLIOGRAPHICAL REVIEW ON SOIL AERATION

The conditions of gas circulation in porous medium possessing a liquid phase are first discussed and are applied to soil as medium.

A schema of the oxygen uptake by plants, giving consideration to aeration conditions, is proposed, and the variations and characteristics of soils in relation to their aeration are discussed.

The role of oxygen in plants and organisms is dealt with.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE RICHTIGSTELLUNG IN DER LITERATUR UBER BODENLÜFTUNG

Zuerst werden die Zirkulationsbedingungen für Gas in porösem Milieu mit flüssiger Phase in Betrachtung gezogen. Dann kommt die Anwendung auf das Milieu Boden.

Es wird ein Schema für Versorgung der Pflanze mit Sauerstoff unter besonderer Berücksichtigung der Lüftungsbedigungen vorgeschlagen. Die Veränderungen und Bodencharakteristiken werden in Beziehung zur Lüftung erörtert.

Alsdann kommt man zur Rolle des Sauerstoffs für die Pflanze und für die Mikroorganismen.

РЕЗЮМЭ

Библиографические итоги аэрации почв.

М. ВИЛЭН (Лаон).

В данной статье, в первую очередь, разсматриваются условия движения газов в порозной среде включающей жидкую фазу. Применяется это к почвенным условиям.

Предлагается схема поступления кислорода в растения принимая во внимание условия аэрации. Разсматриваются изменения и характеристика почв в связи с аэрацией.

И наконец, — статья затрагивает роль кислорода в жизни растений и микроорганизмов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON F. E., CARTER J. W., STERLING LUANN D., 1960. The effect of partial pressure of oxygen on denitrification in soil. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **24**, 283.

ARNON D. I., Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen ion concentration, copper, and oxygen supply. *Soil Sci.*, **44**, 91-122.

BERRY J. L., 1949. The influence of oxygen tension on respiratory rate in different segments of onion roots. *Jour. Cellular comp. Physiol.*, 33, 41.

BERTRAND A. R., KUHNKE H., 1957. Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and the growth of corn roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 135.

BOYNTON D., DE VILLERS J., REUTER W., 1938. Are there different critical oxygen concentrations for the different phases of root activity? *Science*, **88**, 569-570.

CADY F. B., BARTHOLOLOMEW W. V., 1961. Influence of low pO_2 on denitrification processus and products. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 363.

CARMAN P. C., 196. L'écoul ment des gaz à travers les milieux poreux. *Presses universitaires de France* Paris, 194 p.

CURRIE J. A., 1961. Gaseous diffusion in the aeration of aggregated soils. *Soil Sci*, **92**, 40 .

CLEMENTS F. E., 1921. Aeration and the role of oxygen in root activity. *Carnegie Inst. Washington Pub.* 315.

CLINE R. A., ERICKSON A. E., 1959. The effect of diffusion rate and applied fertilizer on the growth, yield and chemical composition of peas. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 333.

DEMOLON A., 1960. La dynamique du sol, tome I. *Dunod*, PARIS.

DE VRIES, D. A., 1950. Some remarks on gaseous diffusion in soils. *Trans. Intern. Congr. Soil. Sci. 4th, Congr.* Amsterdam, 1950. **2**, 41-43.

EPSTEIN E., KOHNKE H., 1957. Soil aeration as affected by organic matter application. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 585.

ERICKSON A. E., VANDOREN D. M., 1960. The relation of plant growth and yield to soil oxygen availability. *Tran. 7th Intern. Congr. Soil. Sci.* Madison, **3**, 48, 432.

FINDLAY A., CREIGHTON H. J. M., 1910. The influence of colloïd and find suspension on solubility of gases in water : I. Solubility of carbon dioxide and nitrous oxide. *Jour. chem. Soc.* (London) **97**, 536-561.

GILBERT S. G., SHIVE J. W., 1962. The significance of oxygen in nutrient substrates for plants : I. The oxygen requirement. *Soil. Sci.*, **53**, 143-152.

GILBERT S. G., SHIVE J. W., 1945. The importance of oxygen in the nutrient substrate for plants relation of the nitrate ion to respiration. *Soil. Sci.*, **59**, 453-460.

GILL W. R., MILLER R. D., 1956. A method for study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 154.

HACK H. R. B., 1956. An application of a method of gaz micro-analysis to study of soil air. *Soil. Sci.*, **82**, 217.

HANKS R. J., THORP F. C., 1956. Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate and crust strength. *Soil . Sci.Amer. Proc.*, **20**, 307.

HEBERT J., 1960. Evolution hebdomadaire de l'azote minéral en sol nu et sous culture pendant deux années, dans le nord de la France. *Trans. 7th Intern. Congr. Soil. Sci.*, Madison, **2**, 83.

KARSTEN S., KENNETH, 1939. Root activity and the oxygen requirement in relation to soil fertility. *Amer. Journ. Botany.*

KEMPER W. D., AMEMIYA M., 1957. Alfalfa growth as affected by aeration and soil moisture, stress under flood irrigation. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21** ; 657.

KEMPER W. D., AMEMIYA M., 1957. Alfalfa growth as affected by aeration and soil moisture, stress under flood irrigation. *Soil. Sci. Soc Amer. Proc.*, **21**,.

KEMPER W. D., 1960. Water and ion movement in thin films between particles or on particle surfaces. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 10-16.

KOLTHOFF I. M., MILLER C. S., 1939. The reduction of oxygen at the dropping mercury electrode. *Jour. Amer. Chem. Soc.*, **61**, 3344.

LEMON E. R., ERICKSON A. E., 1952. The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 160.

LEMON E. R., ERICKSON A. E., 1955. Principles of the platinum microelectrode as a method of characterizing soil aeration. *Soil. Sci.*, **79**, 281.

LEMON E. R., KRISTENSEN J., 1960. An edaphic expression of soil structure. *Trans. 7th intern. Congr. Soil. Sci.*, Madison, **1**, 232.

LETEY J. et *al.*, 1961. Effect of temperature on oxygen diffusion rates and subsequent shoot growth, root growth, and mineral content of two plant species. *Soil. Sci.*, **92**, 314.

LOW P. F., 1962. Effect of quasi cristalline water on rate processes involved in plant nutrition. *Soil. Sci.*, **93**, 6-13.

LUNDEGARTH H., BURSTHOM H., 1935. Untersuchungen über die Atniungsorgange in Pflanzenwurgzeln. *Biochem. Zeitsch*, **277**, 233-249.

MAKOWER B., SHAM T. M., ALEXANDER L. T., 1937. The specific surface and density of some soils and their colloids. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **2**, 101-109.

MARSHALL G. E., 1958. Physico-chemical properties of solide-liquid interfaces in soil systems. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 486-490.

MILLER S. A., A. P., MAZURAK, 1958. Relationships of particle and pore sizes to the growth of Sunflowers. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, **22**, 275.

MILLINGTON R. J., QUIRK J. P., 1960. Transport in porous media. *Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci.*, Madison, **1**, 97.

PARR J. F., REUSZER H. W., 1959. Organic matter decomposition as influenced by oxygen level and method of application to soil. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 214.

PENMAN H. L., 1940. Gas and vapor movements in the soils. I — *J. Agr. Sci.*, **30**, 437-462. ; II — *J. Agr. Sci.*, **30**, 570-581.

PETERS D. B., 1957. Water uptake of corn roots as affected by soil moisture content and tension. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 483.

POCHON J., de BARJAC H., 1958. Traité de microbiologie des sols. *Dunod*, PARIS.

PORTER L. K. et *al.*, 1960 Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc*, **24**, 460-463 .

PLUMMER., 1916. *Cornell agr, Exp. Stat. Bull.* 85, 1-48.

ROBINSON F. E., 1957. A diffusion chamber for studying soil atmosphere. *Soil Sci.*, **83**, 465.

RUNKLES J. R., SCOTT A. D., NAKAYAMA F. S., 1958. Oxygen sorption by moist soils and vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 15.

RUSSELL., APPLEYARD., 1915. The atmosphere of the soil. *Journ. Agr. Sci.*, **7**, 1.

RUSSELL M. B., 1950. Soil aeration and plant growth. *Monograph Agronomy, Cornell Univ.*

RUST R. H., KLUTE A., GIESEKONG J. E., 1957. Diffusion porosity measurements using a non steady state system. *Soil Sci.*, **84**, 453.

SCHEIDEGGER A. E., 1960. The physics of flow through porous media. *University of Toronto Press*, 313 p.

SCHLOESING Th., 1873. *C. R. Acad. Sci.*, **77**, 203-207.

SHAPIRO R. E., TAYLOR G. S., VOLK G. W., 1956. Soil oxygen contents and ion uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20**, 193.

STOKZY L. H. et *al.*, 1961. Influence of soil oxygen diffusion rates on subsceptibility of tomato plants to air borne oxidants. *Soil Sci.*, **91**, 151.

TAYLOR G. S., ABRAHAMS J. H., 1953. A diffusion-equilibrium method for obtaining soil gases under field conditions. *Soil. Sci. Soc. Amer.Proc.*, **17**, 201.

TYLER K. B., BROADBENT F. E., 1960. Nitrite transformations in California soils. *Soils. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 279.

VAN BAVEL C. H. M., 1952. Gaseous diffusion and porosity in porous media. *Soil Sci.*, **73**, 91-104.

WIEGAND C. L., LEMON E. R., 1958. A field study of some plant-soil relations in aeration. *Soil Sci. Soc Amer. Proc.*, **22**, 216.

WOODFORD E. K., GREGORY F. G., 1948. Preliminary results obtained with an apparatus for the study of salt uptake and root respiration of whole plants. *Ann. Bot.* (N. S.) **12**, 335-370.

Ann. agron., 1963, **14** (6), 999-1001

CHRONIQUE DES LIVRES

DES ABBAYES H. et *al.* — BOTANIQUE. ANATOMIE, CYCLES ÉVOLUTIFS, SYSTÉMATIQUE. — Paris, Masson. 1963, 1040 p. (Collection de Précis de Sciences biologiques).

Rédigé à l'intention des étudiants préparant la licence, l'ouvrage sera également apprécié des élèves des grandes écoles biologiques. Cette petite encyclopédie botanique réalise une mise à jour de manuels existants, dont l'utilité n'est plus à démontrer. Outre l'étudiant, le praticien ou l'homme cultivé confronté avec un problème ressortant d'un domaine qui n'est pas le sien, sera intéressé par cette voie d'accès à l'étude qui l'intrigue.

Dans beaucoup de domaines en effet, l'ouvrage réalise une introduction et une initiation à la recherche floristique ou cartographie de la végétation par exemple. On signale l'utilité pratique de l'organisme ou du groupe étudié. On y aborde, de la bactérie à la plante supérieure la plus complexe, les aspects fondamentaux de l'anatomie, de la physiologie, de la reproduction, de la systématique. Il est fait état des acquisitions récentes bien établies. Notons une étude appréciable des algues, domaine jusqu'ici un peu négligé, mais dont l'importance économique est certaine. L'étude consacrée aux champignons représente une excellente introduction à la Pathologie végétale d'origine fongique. Les questions habituelles dans ce genre de manuel (mousses, lichens, ptéridophytes, gymnospermes, sont traitées dans un esprit très ouvert aux applications pratiques possibles et la présentation des angiospermes mérite une mention particulière pour son excellente initiation du lecteur à la botanique pratique. En tant qu'ouvrage d'enseignement, ce précis est une parfaite réussite.

H. J.

TURRILL W. B., edit. — VISTAS IN BOTANY : VOL. II. APPLIED BOTANY. — Oxford, London, etc. Pergamon Press, 1963, 380 p.

Le présent ouvrage groupe une série d'articles de mises au point, rédigés par des spécialistes qualifiés et relatifs à la Botanique appliquée.

L'intérêt de ce genre de publication est de permettre au spécialiste, qui n'a plus le temps matériel d'assimiler tous les résultats obtenus dans son domaine dès qu'ils sont un tant soit peu hors de sa stricte spécialité, de faire le point, et de connaître, par la lecture facile d'un texte bien rédigé, les problèmes d'actualité et leur solution. Une centaine de références bibliographiques relatives aux études fondamentales, placées à la fin de chaque monographie permettent, quand c'est nécessaire, de compléter la documentation analysée et de se faire, dans un minimum de temps, une opinion valable du problème que l'on se propose d'étudier.

Un autre intérêt du présent recueil est d'aborder également des spécialités et spéculations agronomiques peu courantes (cultures de plantes médicinales, exploitation des algues marines, par exemple).

L'ouvrage est une succession de monographies consacrées à l'utilisation de l'histologie végétale en sylviculture et exploitation des bois, à l'application de la botanique et de la phytosociologie à la production rationnelle de l'herbe, aux progrès récents de la génétique des céréales, aux techniques d'amélioration des plantes horticoles, aux aspects de la production fruitière en Angleterre (maladies, parasites, variétés cultivées), à la production des tannins, huiles et essences végétales, cires et pectines à usage industriel, aux cultures médicinales, à l'exploitation des algues marines. Parmi les

monographies spécialisées s'intercalent des développements plus généraux sur l'exploitation et la conservation de la Nature, l'érosion biologique, la pollution de l'air et de l'eau par les activités multiples de l'homme moderne.

H. J.

KOFLER Lucie. — CROISSANCE ET DÉVELOPPEMENT DES PLANTES. — Paris, Gauthier-Villars, 1963, 234 p.

Mme L. KOFLER, botaniste autant que physiologiste, présente ici un ouvrage didactique directement adapté à l'une des deux parties principales du programme national de Physiologie végétale, la physiologie de la croissance et du développement, du certificat de Biochimie-Microbiologie-Physiologie végétale.

L'auteur a introduit avec simplicité, sans formulation pédante inutilement difficile pour des étudiants débutants, la totalité de cette partie du programme, dans sa lettre comme dans son esprit. Elle dit tout l'essentiel, en l'abordant par des notions d'agriculture, d'horticulture, de morphogenèse et de biologie végétale, qui parlent aux yeux, évoquent des souvenirs connus, et se trouvent bientôt replacées dans leur contexte explicatif le plus moderne.

Par conséquent, l'ouvrage pourra également rendre service aux élèves des écoles d'agriculture, ainsi qu'aux candidats à l'agrégation des sciences naturelles.

La première partie envisage les phénomènes de croissance dans la diversité de leurs manifestations et d'une manière aussi large que possible (aspects cinétique, cytologique, morphogénétique...). Le mécanisme hormonal est traité dans la seconde partie. La troisième partie est réservée à l'étude des problèmes particuliers concernant la croissance (croissance pathologique, dormances). Un dernier chapitre évoque brièvement les techniques de conditionnement du milieu.

Il faut souligner aussi que toutes les personnes cultivées et les praticiens éclairés de l'Agriculture et de l'Horticulture trouveront un ouvrage de la meilleure qualité scientifique, intelligible pour eux, bien au courant de cet immense domaine de la physiologie de la croissance et du développement des végétaux, ouvert depuis un demi-siècle à peine, débouchant si directement vers les applications aussi bien que vers les spéculations les plus fondamentales.

(Analyse de l'éditeur.)

SIEGEL S. M. — THE PLANT CELL WALL (La paroi cellulaire des végétaux. Études d'actualité sur l'architecture, la dynamique, la chimie comparée et la technologie dans un système biologique). — Oxford, London, etc., Pergamon Press, 1962, 123 p. (International series of monographs on pure and applied Biology).

L'ouvrage comporte quatre chapitres : constitution et architecture de la paroi cellulaire : techniques d'étude et synthèse des résultats ; physiologie de la paroi cellulaire : biosynthèse, croissance, régulation, phénomènes de lyse, formation des structures macromoléculaires ; chimie comparée des substances intercellulaires et des parois, notamment des lignines ; utilisation des parois cellulaires et de leurs dérivés : bois, fibres, plastiques, origine et formation de la houille.

Les publications de cette série sont intermédiaires entre celles destinées à l'information du « grand public » et les traités destinés aux chercheurs. C'est à la fois l'avantage et l'inconvénient de ce livre, que le lecteur profane trouvera un peu aride et le spécialiste un peu succinct. Néanmoins, la synthèse tentée ici sur un sujet dont les données sont très dispersées dans la littérature scientifique est incontestablement d'un grand intérêt. L'auteur a pris soin de n'utiliser que les faits bien établis, ce qui explique l'absence de mention concernant tel travail ou idée récente. La bibliographie s'arrête aux années 1959-1960. Une place importante est réservée aux travaux modernes, notamment à ceux de l'auteur, concernant les lignines et la lignification.

H. J.

CHOMBART DE LAUWE, POITEVIN J. & TIREL J. C. — NOUVELLE GESTION DES EXPLOITATIONS AGRICOLES. 2e éd. — Paris, Dunod, 1963, 507 p.

Depuis 1957, date de publication de cet ouvrage, les méthodes employées en ce domaine ont été perfectionnées tant en France qu'à l'étranger. Aussi, cette nouvelle édition publiée chez DUNOD, par MM. CHOMBART DE LAUWE, J. POITEVIN et J. C. TIREL, a été remaniée et pratiquement doublée en volume.

Un exposé de la théorie de la production agricole et une étude analytique de la structure de l'exploitation ainsi que des facteurs de la production agricole précédent l'examen proprement dit des méthodes les plus modernes déjà expérimentées et les rend ainsi plus facilement assimilables.

A noter que les explications mathématiques qui ne sont pas indispensables à l'intelligence du texte sont renvoyées en notes, de façon à ne pas rebuter le lecteur non mathématicien.

Illustré d'exemples concrets, ce livre est un instrument de travail pratique et actuel pour les agriculteurs modernes, les professeurs et les élèves des écoles et instituts d'agriculture. Mais il constitue aussi une utile source d'information pour toutes les personnes qui s'intéressent à l'agriculture et à son économie.

(Analyse de l'éditeur.)

LAGUARIGUE J. de — LES BASES SCIENTIFIQUES DE L'AGRICULTURE ET LEURS CONSÉQUENCES IMMÉDIATES. —Paris, Dunod, 1963, 244 p.

Dans cet ouvrage consacré à la production végétale, l'auteur nous dit avoir poursuivi trois buts principaux :

— rassembler. sous forme raisonnée et logique, les considérations relevant de multiples disciplines, que l'on trouve habituellement éparses dans un grand nombre de publications, et qui constituent les bases scientifiques de l'agriculture,

— mettre en lumière, dans la mesure du possible, les liaisons entre les disciplines en jeu et leur orientation vers le but qui leur est assigné : obtenir de hauts rendements, tout en assurant les équilibres biologiques nécessaires au maintien et même à l'accroissement de ces rendements,

— dégager enfin les conséquences pratiques découlant de cette étude et qui doivent guider l'exploitant agricole dans ses diverses activités professionnelles.

On notera en outre, pour chaque question, que l'ouvrage rappelle brièvement les données élémentaires qui la concernent et contient quelques développements d'ordre chimique ou physique, quand cela a paru nécessaire.

Ainsi rédigé, il s'adresse essentiellement aux exploitants agricoles possédant une certaine culture scientifique, aux élèves des Écoles d'agriculture, mais aussi à tous ceux qui s'intéressent aux aspects récents de l'agriculture.

(Analyse de l'éditeur.)

Ann. agron., 1963, **14**

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1963

Mémoires originaux

Baldy (Ch.). — Cultures associées et productivité de l'eau 489
Bouchet (R. J.). — Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole 743
Bouchet (R. J.), de Parcevaux (S.), Arnoux (J.). — Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle 825
Calvet (R.). — Mise au point bibliographique : les complexes organiques des argiles 31
Chaminade (R.). — Influence de la paille à différents états de fermentation sur la fertilité d'un sol 5
Charles (G.). — Influence de la matière organique, humifiée ou non, sur l'évaporation. Étude expérimentale sous climat méditerranéen 849
Damagnez (L.), Riou (Ch.), de Villèle (O.), El Amami (S.). — Problèmes d'évapotranspiration potentielle en Tunisie 543
Dejou (J.). — Étude de la fraction argileuse de quatre échantillons de sols du Centre Nivernais 919
Delmas (J.), Poitou (N.), Levadou (B.). — Les acides organiques dans la feuille de Vigne 951
Duchaufour (Ph.), Jacquin (F.). — Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlés par l'électrophorèse 885
Duval (L.). — Application de la méthode densimétrique aux sols de Bretagne 219
Féodoroff (A.), Rafi (M.). — Évaporation de l'eau à partir du sol nu. Rôle de l'état structural 601
Girard (M.), Baldy (Ch.). — Rendement et évapotranspiration potentielle dans une oasis du Bas-Sahara (El Arfiane-Oasis) 571
Godard (M.). — Transpiration et maturation du Blé dans le Languedoc méditerranéen 835
Guennelon (R.). — Contrôle analytique des chaux viticoles par thermogravimétrie 939
Guitian-Ojea (F.), Coppenet (M.). — Étude des principaux types de sols de Bretagne 195
Guyot (G.). — Les brise-vent. Modification des microclimats et amélioration de la production agricole 429
Hallaire (M.), Baldy (Ch.). — Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de l'eau 381
Hallaire (M.). — Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement 393
Jouis (E.), Lecacheux (M. T.). — Les sols et l'agriculture dans les terrains humifères de la vallée de Basse-Seine 13
Lefebvre-Drouet (E.), Mériaux (S.). — Bilan des cations échangeables en sols lessivés 239
Liwerant (J.). — Relations entre le degré d'acidité et le niveau nutritif des sols d'alluvions anciennes de la Garonne 227

LOCOSTE (E.). — Calcul graphique de l'évapotranspiration potentielle, selon les formules de R. J. BOUCHET et L. TURC 615
MAZOYER (R.). — Possibilités de formation de pyrophosphates lors de la calcination des végétaux. Leurs conséquences sur le dosage de P 873
MAZOYER (R.). — Essai de simplification des dosages des formes d'azote (ammoniacal, nitrique, uréique) dans un engrais liquide azoté 931
MÉRIAUX (S.). — Essai d'interprétation des mesures de pression de succion des feuilles 535
PARCEVAUX (S.) de. — Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu 654
PÉRIGAUD (S.). — Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne (sols hydromorphes). Première partie 121
Deuxième partie 261
REISS (L. A.). — Quantités d'eau d'irrigation par rapport aux données de l'appareil PICHE sous abri 559
RIVIÈRE (J.). — Rhizosphère et croissance du Blé 619
SIMONNEAU (P.), AUBERT (G.). — L'utilisation des eaux salées au Sahara .. 859
VERNET (A.). — Évaporation de l'eau du sol 587
VILAIN (M.). — L'aération du sol. Mise au point bibliographique 967

CHRONIQUE DES LIVRES

ABBAYES (H. des) et *al.* — Botanique, anatomie, cycles évolutifs, systématique 999
CHOMBART DE LAUWE, POITEVIN (J.), TIREL (J. C.). — Nouvelle gestion des exploitations agricoles 1001
GRAČANIN. — Verbreitung und wirkung der bodenerosion in kroatien 881
JAVILLIER (M.), POLONOVSKI (M.), FLORKIN (M.), BOULANGER (P.), LEMOIGNE (M.), ROCHE (J.), WURMSER (R.). — Traité de Biochimie Générale. Tome II. Les agents des synthèses et des dégradations biochimiques. Premier fascicule : Vitamines, Oligoéléments, Hormones 119
KOFLER (L.). — Croissance et développement des plantes 1010
LAGUARIGUE (J. de). — Les bases scientifiques de l'Agriculture et leurs conséquences immédiates 1001
SIEGEL (C. M.). — The plant cell wall 1000
TURRILL (W. B.). — Vistas in Botany, Vol. III : Applied botany 999

Le Directeur-Gérant: M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 30-12-1963.

Dépôt légal: 4e trimestre 1963. N° d'impression: 1269.